

**Grundlagen für ein bordautonomes  
Handlungskonzept zur  
Unfallfolgenminderung  
im Querverkehr**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Julian Philip Alexander Heck

aus Braunschweig

eingereicht am 04.11.2014

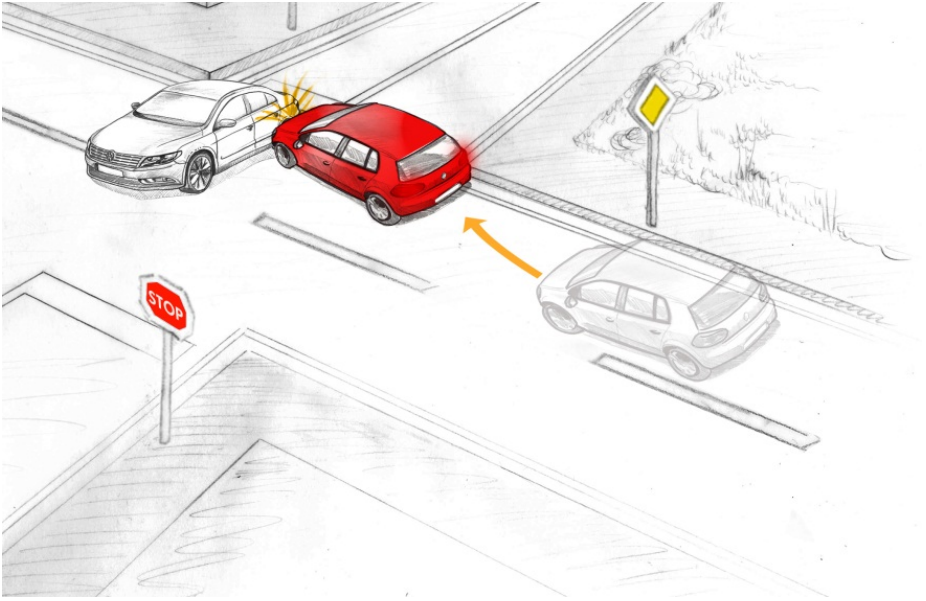
mündliche Prüfung am 08.05.2015

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer

2. Referent: PD Dr. Kai-Uwe Schmitt

Druckjahr: 2015





# **Grundlagen für ein bordautonomes Handlungskonzept zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr**

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.



---

## Kurzfassung

Fahrerassistenzsysteme zur Unfallfolgenminderung nutzen häufig eine Vollbremsung als ultima ratio, wenn eine Kollision nicht mehr vermieden werden kann. Diese Arbeit untersucht inwiefern eine Bremsung das Verletzungsrisiko für Kollisionen mit querendem Verkehr beeinflusst. Das Ziel ist es ein bordautonomes Handlungskonzept zu definieren, bei dem kein Beteiligter ein erhöhtes Verletzungsrisiko aufgrund einer automatischen Intervention hat.

Dafür wird zunächst die Verletzungswahrscheinlichkeit im Querverkehr untersucht. Diese hängt wesentlich von der Trefferlage ab, also dem Ort an dem das stoßende Fahrzeug seitlich auf das gestoßene Fahrzeug trifft. Bisherige Konzepte zur Unfallfolgenminderung im Längsverkehr gehen mit einem Bremseingriff zur Reduktion der Geschwindigkeit einher. Im Querverkehr führt ein Bremseneingriff automatisch zu einer Verschiebung der Trefferlage. Die Analyse bisheriger Forschungsprojekte und weiterführender Literatur zeigt, dass dieser Aspekt bisher nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Mit bordautonomer Sensorik ist es zudem bisher nicht möglich die Insassenbelegung des gestoßenen Fahrzeugs zu ermitteln, um günstige Trefferzonen zu identifizieren.

Für die Definition eines Handlungskonzepts müssen jedoch universelle Punkte festgelegt werden, an denen das stoßende Fahrzeug treffen kann. Diese Punkte sollten bezogen auf das Verletzungsrisiko aller am Unfall Beteiligter minimal sein. Diese Arbeit schlägt zwei Punkte vor. Diese sind das Treffen der Vorderachse mit dem rechten Längsträger und das Treffen der Hinterachse mit dem linken Längsträger. Ausgehend von dieser grundlegenden Überlegung wird das Wirkfeld anhand von Unfalldaten untersucht und eine Potenzialeinschätzung zur Erkennung mittels Bordsensorik gegeben. Mithilfe einer Gefahren- und Risikoanalyse werden Randbedingungen abgeschätzt, um aufzuzeigen mit welchen Einschränkungen eine Serienentwicklung durchführbar erscheint. Die Trefferlagenänderung wird zusätzlich im Kontext rechtlicher und ethischer Betrachtungsweisen eingeordnet. Die Gesamtheit der entwickelten Anforderungen geht in den Vorschlag einer konsistenten Funktionsdefinition ein. Für diese werden wesentliche Auswirkungen der Eingriffe diskutiert und ein Verfahren zur Entscheidungsfindung

---

vorgestellt, das einen Eingriff nicht statisch mit festen Zeitparametern auslöst. Das Verfahren nutzt die geschätzte Unfallschwere, um einen Eingriff in Abhängigkeit des ermittelten Verletzungsrisikos auszulösen.

Die vorgeschlagene Funktion wurde in diversen Studien untersucht. Dazu zählen eine Probandenstudie im Vehicle-In-The Loop Verfahren und zwei Studien in Fahrsimulatoren. Zusätzlich erfolgte eine prototypische Umsetzung im Versuchsträger mit entwicklungsbegleitenden Tests. Im Rahmen des EU-Projekts interactIVe wurden die Ergebnisse überprüft und eine breite Öffentlichkeit konnte das Ergebnis selbst Probe fahren.

---

## Abstract

Braking has long been thought of as the ultimate measure for collision mitigation. While this stands true for longitudinal traffic, this work takes an in-depth look at crossing traffic. The goal is to define an action concept that uses only onboard sensors and ensures that no one involved in the accident has a higher injury risk, due to an automatic intervention.

The work starts with an analysis of collision mitigation systems. Research projects and literature that focus on crossing traffic give little or no regard to the location of impact. Yet the impact location plays an important role to determine injury risk. By breaking, the bullet car deliberately changes the location of impact. Future systems must take the impact location into account to determine the outcomes of an intervention. Using onboard sensors, no exact estimation of injury risk can be calculated. However hitting the front axis with the right longitudinal support structure and hitting the rear axis with the left longitudinal support structure is considered best in terms of injury risk.

Concentrating on these locations an intensive discussion of boundary conditions is conducted to define requirements. Accident statistics from the German In-Depth Accident Survey (GIDAS) database are analyzed to determine the effects on traffic safety. A threat and risk assessment is conducted to identify constraints that limit a possible series development. In addition, legal and ethical aspects are discussed. Based on the defined requirements a consistent function is derived. The effects of such an intervention action concept are discussed, and a decision technique is introduced. This decision unit does not use hard coded time gaps to start an intervention. Instead, an injury risk assessment is conducted. Depending on injury risk levels an appropriate action is chosen.

Finally the results from surveys of the function or parts thereof are presented. The focus lies on a vehicle in the loop study. In addition, two simulator studies were conducted. The action concept was implemented in an experimental vehicle. To determine the achieved accuracies, the system was tested on different proving grounds. As this research was part of the EU project interactIVe, the final results were externally evaluated, and the implemented function could be tested by a broad audience at the final event.

---

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während und im Anschluss an meine Tätigkeit in der Volkswagen Konzernforschung und am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Die praktische Umsetzung und Erprobung erfolgte teilweise im Rahmen des EU-Projekts InteractIVe. In dieser Zeit mit vielfältigen Herausforderungen und einer Menge schöner Momente erfuhr ich Unterstützung durch eine Vielzahl von Personen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Markus Maurer, für die universitäre Betreuung und die vielen fachlichen Diskussionen, sowie Herrn Prof. Dr. Bernd Lichte für die Begleitung und das Feedback in den ersten Jahren. Bedanken möchte ich mich bei Herrn PD Dr. Kai-Uwe Schmitt für die Übernahme des Korreferats und bei Herrn Prof. Dr. Walter Schumacher für die Leitung der Prüfungskommission. Weiterhin danke ich Herrn Tom Michal Gasser und Herrn Prof. Dr. Patrick Lin für die externe Begutachtung.

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit bei der Volkswagen AG entstanden. Die angenehme Arbeitsatmosphäre und die konstruktive Unterstützung haben zu den Ergebnissen meiner Arbeit beigetragen. Mein Dank gehört daher zuerst meinen beiden Vorgesetzten, Herrn Thomas Ruchatz und Herrn Dr. Mark Gonter, für die gebotenen Möglichkeiten in der Konzernforschung, sowie stellvertretend den Mitgliedern des Urban Safety Teams Frau Dr. Ellen Wykowski, Herrn Thomas Wohllebe, Herrn Tom Wagemann, Herrn Dr. Jan Aue, Herrn Stefan Wonneberger, Herrn Dr. Thorsten Graf und Herrn Dr. Jan Effertz.

Ich möchte mich auch bei Herrn Andreas Jungbluth für seine Unterstützung bei der Durchführung der rateEffect Simulationen zur Effizienzbestimmung bedanken. Vielen Dank an die Kollegen aus InteractIVe, insbesondere an Frau Dehlia Willemsen für die Testkoordination bei TNO, an Herrn Prof. Dr. Radim Šára, Herrn Dr. Martin Matoušek, Herrn Ondrej Sychrovský und Herrn Radek Svoboda für die Entwicklung der Bildverarbeitung am CTU der TU Prag, sowie an Herrn Tom Michael Gasser und Herrn Daniel Westhoff von

---

der Bundesanstalt für Straßenwesen für die rechtliche Einschätzung und die diesbezügliche Diskussion.

Für die praktische Umsetzung gilt mein Dank insbesondere Herrn Heiko Scholz und Herrn Omar El-Mikati. Danke für die vielen tollen Ideen und die nie versiegende Unterstützung. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Stefan Olders, Herrn Markus Schaper und Herrn Christoph Stamprath für die Konstruktion des Zielobjekts sowie den Umbau und Betrieb der Windenanlage während unserer Versuche.

Besonderer Dank geht an die „Oase“, Herrn Sebastian Thomschke und vor allem an meine Studenten Frau Stefanie Köppe, Herrn Markus Schaper und Herrn Christoph Stamprath für ihr Mitwirken und ihren Input zu dieser Arbeit. Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Jan Bellin für seine langjährige Unterstützung, Mitarbeit und Ideen bedanken.

Für die Bereitstellung der Daten der Probandenstudie möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Dr. Ellen Wykowski bedanken. Besonders erwähnen möchte ich Herrn Thomas Wohllebe, ohne dessen Vertrauen und Unterstützung ich diese Arbeit so nicht hätte umsetzen können.

Mein ganz besonderer Dank gehört Herrn Dr. Mirko Junge. Unzählige E-Mails, Korrekturanmerkungen und Diskussionen zeugen von seinem großen persönlichen Einsatz. Darüber hinaus war er mir ein besonderes Beispiel für wissenschaftliche Akribie und tatkräftiger Unterstützer bei der Organisation zahlloser Quellen. Zweifelsohne wäre ohne sein Vorbild die notwendige Motivation zur Erstellung dieser Arbeit vorzeitig versiegt. Danke!

Mein größter Dank gilt meiner Familie für das endlose Verständnis und die jahrelange Unterstützung. Danke an Murrel, Axel, Birgit und Lena für euren Langmut, eure Geduld, euren Verzicht und euren unermüdlichen Einsatz.

Für Murrel

# Inhaltsverzeichnis

<b>I Einführung und Stand der Technik</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>3</b>
1.1 Begriffsdefinition . . . . .	12
1.1.1 Handlungskonzept . . . . .	12
1.1.2 Querverkehr . . . . .	13
1.1.3 Fahrgastzelle . . . . .	14
1.2 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	18
1.3 Inhaltliche Gliederung der Arbeit . . . . .	22
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>25</b>
2.1 Angabe der Verletzungsschwere . . . . .	31
2.2 Entwicklung der integralen Sicherheit . . . . .	33
2.2.1 Entwicklung der passiven Sicherheit . . . . .	35
2.2.2 Entwicklung der aktiven Sicherheit . . . . .	39
2.2.3 Handlungskonzepte der unfallfolgenmindernden Sys- teme im Längsverkehr . . . . .	42
2.3 Kritikalitätsberechnung und Unfallschwereprognose . . . . .	50
2.4 Funktionale Systemarchitektur und Entwicklungsmethodik . . . . .	55
2.5 Fahrerassistenz an der Kreuzung . . . . .	59
2.6 Zusammenfassung . . . . .	73
<b>II Ein Handlungskonzept zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr</b>	<b>75</b>

<b>3</b>	<b>Randbedingungen und Anforderungen</b>	<b>77</b>
3.1	Verletzungswahrscheinlichkeit im Querverkehr . . . . .	79
3.1.1	Grundlagen des Verletzungsrisikos . . . . .	80
3.1.2	Einfluss der Trefferlage . . . . .	89
3.1.3	Einfluss der Geschwindigkeit . . . . .	97
3.2	Wirkfeld im Querverkehr . . . . .	105
3.2.1	Wirkfeld anhand GIDAS . . . . .	106
3.2.2	Unfallanalyse des Wirkfeldes . . . . .	111
3.3	Potenzialabschätzung im Querverkehr . . . . .	120
3.3.1	Sensorisch erkennbare Unfälle . . . . .	121
3.3.2	Fahrdynamische Betrachtungen . . . . .	138
3.3.3	Mensch-Maschine-Schnittstelle . . . . .	146
3.4	Gefahren- und Risikoanalyse . . . . .	151
3.4.1	Mögliche Funktionsausprägungen . . . . .	152
3.4.2	CoP-ADAS: Entwicklung und Validierung . . . . .	156
3.4.3	G&R nach ISO 26262 . . . . .	158
3.5	Rechtliche Randbedingungen . . . . .	167
3.5.1	ECE-Homologation . . . . .	169
3.5.2	Verhaltensrechtliche Bewertung . . . . .	172
3.5.3	Zivilrechtliche Bewertung . . . . .	176
3.5.4	Haftungsrechtliche Bewertung . . . . .	176
3.6	Ethische Diskussion der Trefferlagenänderung . . . . .	182
3.6.1	Einführung . . . . .	184
3.6.2	Betrachtung der Trefferlagenänderung im Querverkehr	192
3.6.3	Zusammenfassung und Bewertung . . . . .	203
<b>4</b>	<b>Konsistente Funktionsdefinition</b>	<b>205</b>
4.1	Handlungsablauf . . . . .	208
4.1.1	Warnungen – FVCW + FVCC . . . . .	209
4.1.2	Eingriffe – FVCM + FVCA . . . . .	212
4.1.3	Auslaufverhalten nach der Kollision . . . . .	222
4.1.4	Auswirkungen von Fehleingriffen . . . . .	224
4.2	Eingriffsentscheidung . . . . .	226
4.2.1	Situationsrepräsentation . . . . .	229
4.2.2	Handlungsrepräsentation . . . . .	230



4.2.3	Entscheidungsverfahren . . . . .	231
<b>III</b>	<b>Umsetzung im praktischen Versuch</b>	<b>240</b>
<b>5</b>	<b>Experimentelle Verifikation</b>	<b>241</b>
5.1	Das unfallfolgenmindernde System im Realfahrzeug . . . .	243
5.1.1	Realisierung der Steuerung . . . . .	243
5.1.2	Erprobung im Prüfgelände . . . . .	256
5.2	Das unfallfolgenmindernde System in der Simulation . . . .	263
5.2.1	Untersuchung am DLR . . . . .	264
5.2.2	Untersuchung bei Volkswagen . . . . .	265
5.2.3	Untersuchung am CTAG . . . . .	269
<b>6</b>	<b>Berechnung der resultierenden Effizienz</b>	<b>273</b>
6.1	Unfallvermeidung . . . . .	275
6.2	Unfallfolgenminderung . . . . .	276
6.3	Zusammenfassung . . . . .	278
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>281</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>287</b>
	<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>327</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>331</b>
A.1	Historie der Sicherheitssysteme . . . . .	331
A.2	Betrachtete Unfalltypen . . . . .	333
A.3	Mehrkörperstrukturmodelle . . . . .	334
A.4	Wirkfeldanalyse der Geschwindigkeiten . . . . .	337
A.5	Verletzung der Finger und Hände . . . . .	339
A.6	ISO 26262 Bewertung . . . . .	341
A.7	Versuche zur Längsverzögerung . . . . .	347
A.8	Auswertung der Probandenbefragung . . . . .	348



# **Teil I**

## **Einführung und Stand der Technik**



# Kapitel 1

## Einleitung und Motivation

Mit der Erfindung des Automobils und den daraus resultierenden Möglichkeiten zum individuellen Kraftverkehr stiegen die Freiheiten in der Mobilität gegenüber denen anderer Verkehrsträger<sup>1</sup>, aber auch die damit verbundenen Risiken an (Vorndran 2010). Im Jahr 2011 verunglückten deutschlandweit 396.374 Menschen im Straßenverkehr. Davon verstarben 4.009 Personen innerhalb von 30 Tagen an den Unfallfolgen (Destatis 2012). Ein Vergleich der absoluten Unfallzahlen aller Verkehrssysteme zeigt, dass die meisten Unfälle, bei denen Personen getötet oder verletzt werden, sich mit Personenkraftwagen<sup>2</sup> ereignen.<sup>3</sup> Die Teilnahme am Straßenverkehr ist für viele Länder heute zum größten unnatürlichen Sterberisiko avanciert (WHO 2009). Gleichwohl

---

<sup>1</sup> Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr.

<sup>2</sup> Die Europäische Richtlinie 2007/46/EG (RL 2007/46/EG, S. 68) nutzt zur Begriffsbestimmung die Definition der ISO 3833: „A motor vehicle [...] which, on account of its design and appointments, is intended mainly for carrying persons and their luggage [...] and which has available a maximum of nine seating places, including the driving seat.“ (ISO 3833 (1977)). Im Folgenden ist daher, wenn nicht anders spezifiziert, der Begriff Fahrzeug im Sinne dieser Definition als Personenkraftwagen (M<sub>1</sub>) zu verstehen.

<sup>3</sup> Ein genauer Vergleich der Verkehrssysteme untereinander ist nur mit einer gewissen Unschärfe möglich. Vorndran (2010) bewertet das Risiko, bei einem Verkehrsunfall tödlich zu verunglücken, für Personenkraftwagen größer als mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Zugleich diskutiert sie die methodischen Unterschiede bei der Erhebung der Unfallmerkmale und Daten, die eine für jedes System unterschiedliche Datenbasis bedingen. Die Messgröße (beförderte Personen, Fahrtstrecke/-dauer, Starts-Stopps etc.) hat beim Vergleich darüber hinaus einen großen Einfluss. Vorndran kommt zu dem Ergebnis, dass der Personenkilometer die beste Messgröße für einen Vergleich darstellt, da hierbei die „Verkehrsleistungen: ‚gefahrte Kilometer‘ und ‚Anzahl der beförderten Personen‘“ berücksichtigt werden. Dies kompensiert „Verzerrungen, die sich beim Benutzen nur einer dieser Messgrößen ergeben würden“.

ist die Akzeptanz beim Nutzer trotz dieser Gefahren<sup>4</sup> ungebrochen groß und die zurückgelegte Fahrleistung in Deutschland hat sich innerhalb der letzten 20 Jahre um mehr als 22 % erhöht (Lerner et al. 2013).<sup>5</sup> Auf starke Bemühungen der Staatengemeinschaften<sup>6</sup> und der Industrie ist es zurückzuführen, dass sich die Zahl der Todesfälle innerhalb der letzten Jahre in der Europäischen Union rückläufig entwickelt hat. Die Gesamtzahl der Todesfälle im Straßenverkehr von 2011 bis 2020 innerhalb der EU weiter zu halbieren, ist das politisch erklärte Ziel der EU und seiner Mitglieder, unter anderem Deutschlands.<sup>7</sup>

---

<sup>4</sup>Backer-Grøndahl & Fyhri (2009) geben eine ausführliche Übersicht des Stands der Forschung zur individuellen Risikowahrnehmung der verschiedenen Verkehrsträger (vergleiche Slovic (1987) für eine Einführung zur Risikowahrnehmung). Bei der Beurteilung durch die Nutzer sollte zum einen unterschieden werden zwischen „unintentional events“ (Unfällen) und „intentional events“ (Straftaten, Terrorismus etc.) und zum anderen zwischen der jeweils auf einen Verkehrsträger bezogenen intuitiven Sorge „worry“ und der bewussten, rationalen Beurteilung des statistischen Risikos „probability“ bei Benutzung (Backer-Grøndahl & Fyhri 2009, Kapitel 5.7). Demzufolge ergibt sich für das Automobil eine niedrigere Risikoeinschätzung, da die subjektiv empfundene Kontrollierbarkeit der Unfallwahrscheinlichkeit und der Unfallschwere (vergleiche Slovic (2000, Kapitel 6 + 8)) höher und die mediale Berichterstattung vorteilhafter ist (vergleiche Moen & Rundmo (2006)).

<sup>5</sup>Vergleiche Tabelle 1.1 für eine detaillierte Übersicht.

<sup>6</sup>Wichtige Programme zur Steigerung der Verkehrssicherheit in Europa gehen auf das White Paper der Europäischen Kommission (European Commission 2001) bzw. das „3rd Road Safety Action Programme“ (European Commission 2003) zurück. Deutschland hat diese politische Vorgabe unter anderem im „Programm zur Sicherheit im Straßenverkehr“ umgesetzt (BMVBW 2001). Vergleichbare Programme existieren außerhalb der EU in ähnlicher Form. Beispielsweise in den USA mit dem FHWA Safety Program (vergleiche <http://safety.fhwa.dot.gov/>, Stand Oktober 2013), in Japan mit dem „Eighth Fundamental Traffic Safety Program“ (vergleiche <http://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku8/19html/gaiyo.html>, Stand Oktober 2012) oder in China mit dem „National Road Traffic Safety Plan“ als Teil des jeweiligen Fünfjahresplans.

<sup>7</sup>Vergleiche dazu das „Make Roads Safe“ Programm der UN, bzw. das „4th Road Safety Action Programme“ der EU (European Commission 2010), die eine Halbierung bezogen auf die gesamte EU vorsehen, bzw. das daraus abgeleitete Verkehrssicherheitsprogramm 2011 (BMVBS 2011), das eine Reduktion der Todesfälle im Straßenverkehr in Deutschland um (nur) 40 % bis 2020 vorsieht.

---

<b>Tabelle 1.1:</b> Übersicht der Fahrleistung und Unfallzahlen in Deutschland <sup>8</sup>					
	1991	2001	2006	2011	2013 <sup>9</sup>
Kfz-Bestand	~44,550 <sup>10</sup>	46,607	48,445	50,902	52,393
davon:					
Pkw [Mio.]	—	39,059	40,660	42,302	43,431
Fahrleistung [Mio. km]	574.219	682.900	690.104	717.559	724.000
Unfälle mit Per- sonenschaden	385.147	375.345	327.984	306.266	287.000
Verunglückte	516.835	501.752	427.428	396.374	373.000
davon:					
leicht	374.442	399.735	347.835	323.380	303.800
schwer	131.093	95.040	74.502	68.985	65.900
tödlich	11.300	6.977	5.091	4.009	3.300

---

Betrachtet man die Entwicklung im Straßenverkehr zwischen 1991 und 2006 am Beispiel Deutschlands genauer, ergibt sich ein differenzierteres Bild.<sup>11</sup> Die absolute Zahl der Unfälle nimmt in diesem Zeitraum um 3,4 % ab. Die absolute Zahl der Verunglückten geht um ca. 15 % zurück. Betrachtet man die Anteile und Art der Personenschäden, ergibt sich eine deutliche Reduktion der Todesfälle (-45 %) und Schwerverletzten (-57 %). Die Zahl der Leichtverletzten nimmt nur um 7 % ab. Die absolute Zahl der jährlichen Verkehrstoten konnte somit deutlich reduziert werden<sup>12</sup>, trotz einer Steigerung der jährlichen Fahrleistung und gleichbleibenden Investitionen in neue Infra-

---

<sup>8</sup>Quellen: Kraftfahrzeugbestand (Destatis 2013), Fahrleistung (Maier et al. 2012; Kunert et al. 2012), Unfallangaben (Destatis 2012), Schätzungen 2013 (Lerner et al. 2013).

<sup>9</sup>(Gerundete) Schätzung nach Lerner et al. (2013).

<sup>10</sup>Schätzwert aufgrund der Vereinheitlichung der Erfassung im Zuge der Wiedervereinigung Deutschlands.

<sup>11</sup>Maier et al. (2012) beschreiben detailliert die Entwicklung der Verkehrssicherheit bis 2006 und prognostiziert die Entwicklung bis 2020.

<sup>12</sup>Die politische Vorgabe einer Reduktion um die Hälfte zwischen 2001 und 2011 konnte in Deutschland mit 47 % fast erreicht werden (BMVBW 2001; BT-Drs. 17/10600).

struktur bzw. in den Straßenbau (in Deutschland). Besonders hervorzuheben ist die Reduktion über alle medizinischen Schwereklassen. Die zu vermutende Verschiebung von tödlich zu schwer bzw. schwer zu leicht Verletzten wurde durch die absolut stark gestiegene Verkehrssicherheit überkompensiert.

Zu dieser Senkung haben eine Reihe von Verbesserungen beigetragen: Infrastruktur- und Verkehrslenkungsmaßnahmen, Verbesserungen im technischen Rettungswesen und der medizinischen Traumaversorgung sowie Verbesserungen am Kraftfahrzeug selbst. Wie hoch der individuelle Anteil der einzelnen Maßnahmen am Ergebnis ist, lässt sich nicht genau bestimmen. Abbildung 1.1 zeigt das Potenzial der Fahrzeugsicherheit. Da zwischen erstmaliger Einführung und 100 % Marktdurchdringung lange Zeiträume vergehen<sup>13</sup>, ist der jeweilige Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit erst bei einer entsprechenden Verbreitung messbar.

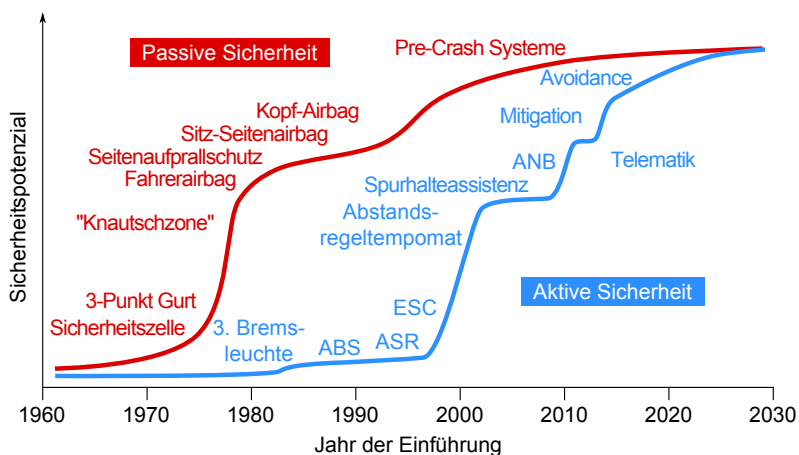
Die jährliche Abnahme der Verunglücktenzahlen drückt die Effektivität der Gesamtheit aller Maßnahmen aus. Zur Bestimmung der jeweiligen Ursachen und Anteile einzelner Maßnahmen ist es notwendig die Einflussfaktoren der Verkehrssicherheit genauer zu betrachten. Abbildung 1.2 schlüsselt den Rückgang der Getöteten und Schwerverletzten zwischen 1991 und 2006 nach Verkehrsbeteiligung auf. Alle Beteiligungsarten weisen eine Abnahme auf. Die größten Rückgänge sind bei Fußgängern und Pkw-Insassen zu verzeichnen. Zur Prognose bis 2020 werden eine Reihe von Modellen verwendet, die das Verletzungsrisiko, basierend auf statistischen Annahmen zur Verkehrsentwicklung, berechnen.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup>Das amerikanische Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) kommt bei einer Betrachtung bisher eingeführter Systeme auf einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, bis ein neues Sicherheitssystem in 95 % aller Fahrzeuge (Pkw) im Straßenverkehr verfügbar ist (IIHS 2012). Diese Zeit ist vor allem durch die geringe Laufleistung und geringe Betriebsstunden bei privater Nutzung vorgegeben bzw. durch die Dauer, bis ein System in allen Fahrzeugkategorien verfügbar ist. Für Lkw, die im Flotten- bzw. Leasingbetrieb eine höhere Laufleistung aufweisen, kann in Staaten der 1. Welt von einer kürzeren Zeit, ca. drei Jahren, ausgegangen werden (wenn ein System bei Neuanschaffungen gesetzlich vorgeschrieben bzw. wirtschaftlich sinnvoll ist).

<sup>14</sup>Die Prognose geht davon aus, dass es zum einen zu einer Erhöhung der jährlichen Fahrleistungen aber auch zu einer Verringerung der Verletzungsrisiken durch Fortschritte im Bereich der Fahrzeugsicherheit kommt. Sollten die Verletzungsrisiken auf dem Stand von 2006 stagnieren und sich nur die Fahrleistungen erhöhen, ändert sich das Ergebnis und die prognostizierte



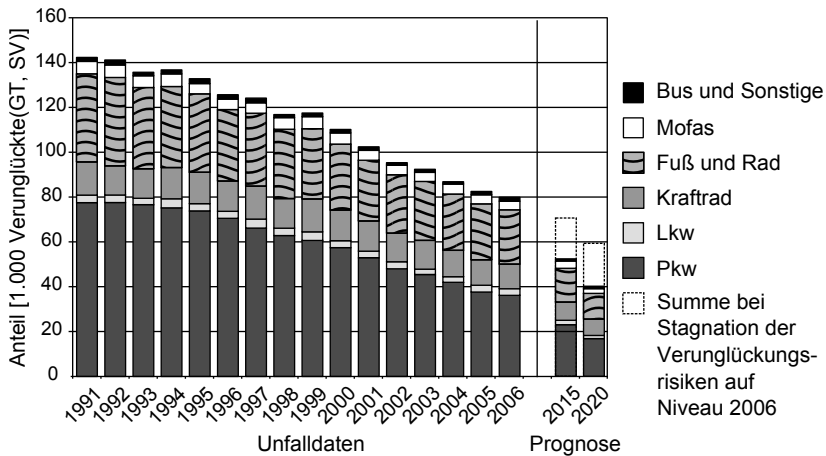


**Abbildung 1.1:** Sicherheitspotenzial aktiver und passiver Systeme (Junge 2012)

Für die Entwicklung in der Fahrzeugtechnik sind diese Prognosen und Annahmen bezüglich zukünftiger Nutzung hilfreich, da sie den benötigten Bedarf zur Assistenz bzw. zur Verbesserung der aktiven und passiven Sicherheit aufzeigen.<sup>15</sup> Zusätzlich bieten die Modelle zur Verkehrsentwicklung eine Möglichkeit zur Prognose der Wirksamkeit neuartiger Systeme, wenn sie im Markt verfügbar werden. Dafür müssen die Auswirkungen verschiedener Möglichkeiten zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit miteinander verglichen werden. Das Dose-Response-Modell von Kullgren (1998) in Abbildung 1.3 beschreibt den Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren und seinen Auswirkungen. Seinem Modell liegt ein Verletzungsrisiko in Form einer Sigmoiden zugrunde, die den prinzipiellen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Unfälle und den dabei Verunfallten beschreibt. Das Ver-

Zahl der schwer verunglückten Pkw-Insassen steigt um nahezu zwei Drittel (65 %) (Maier et al. 2012, Kapitel 6.3).

<sup>15</sup>Kramer (2009, Kapitel 1) definiert die aktive Sicherheit als „unfallvermeidende Maßnahmen zur Herabsetzung der Unfallhäufigkeit“ und die passive Sicherheit als „unfallfolgenmindernde Maßnahmen zur Begrenzung des zu erwartenden Schadens“. Vergleiche auch Donges (1992) und Naab & Reichart (1998).

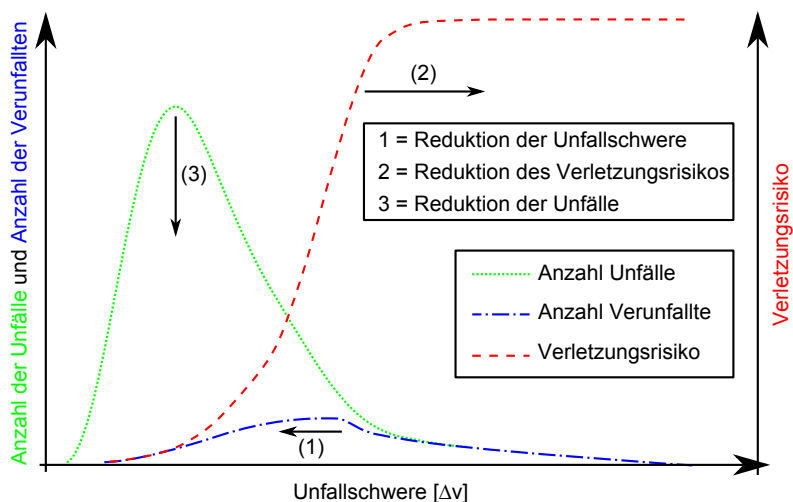


**Abbildung 1.2:** Aufteilung der Verunglücktenzahlen Schwerverletzter (SV) und Getöteter (GT) nach Verkehrsbeteiligung und prognostizierte Entwicklung bei steigenden Fahrleistungen und Rückgang der Verletzungsrisiken nach Maier et al. (2012)

letzungsrisiko steigt mit zunehmender Unfallschwere. Die Anzahl der Verunfallten ergibt sich damit über die Anzahl der Unfälle bei einer bestimmten Unfallschwere.

Das Modell verdeutlicht damit auf anschauliche, wenn auch stark abstrahierte, Weise die drei Stellgrößen, anhand derer die Fahrzeugsicherheit Einfluss auf die Verunglücktenzahlen nehmen kann. Durch Reduktion

- der Unfallschwere: Verringerung der technischen Unfallschwere mit Maßnahmen der aktiven und passiven Sicherheit.
- des Verletzungsrisikos: Verringerung der Unfallfolgen mit Maßnahmen der passiven Sicherheit.
- der Unfälle: Unfallvermeidung mit Maßnahmen der aktiven Sicherheit.



**Abbildung 1.3:** Einflussfaktoren auf die Fahrzeugsicherheit nach Kullgren (1998)

Aktive und passive Sicherheit tragen damit gemeinsam zu einer Reduktion der Verunglücktenzahlen und Getöteten bei (Kramer 2009, Kapitel 1). Kullgren (2008) berechnete anhand dieser Modellbildung in 2008 die Auswirkungen des Volvo City Safety Systems<sup>16</sup> und prognostizierte eine Reduktion der Verletzungen bis zu 60 % in Fahrzeugen mit diesem System. Das IIHS (2011) untersuchte anhand von Versicherungsdaten die Effizienz dieses Systems im Feld. Im betrachteten Zeitraum kam es dadurch zu einer Reduktion der Versicherungsfälle mit Personenschaden um 51 % im Vergleich zu anderen „midsize SUVs“.<sup>17</sup>

<sup>16</sup>Volvo City Safety ist ein automatisches Notbremsssystem, das dem Fahrzeugführer hilft eine Kollision zu vermeiden oder die Kollisionsgeschwindigkeit zu vermindern. Es ist aktiv im Geschwindigkeitsbereich bis 50km/h und wurde 2008 erstmalig im Volvo XC60 eingeführt. Vergleiche Distner et al. (2009) und Volvo Cars (2012).

<sup>17</sup>Vergleiche auch (HLDI 2011): „Claim frequencies [per 100 insured vehicle years] under bodily injury liability coverage for the XC60 were only half (51 percent) of those for other midsize luxury SUVs and slightly less than half (49 percent) of those for other Volvo vehicles.“ Anzumerken bleibt, dass diese Untersuchung im Jahr der Markteinführung einem Ramp-Up

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, welches Potenzial automatisch eingreifende Systeme in den nächsten Jahren auf das Unfallgeschehen haben werden.<sup>18</sup> Waren bisherige Sicherheitssysteme oftmals als Einzelsysteme mit individuell erreichbarer Schutzwirkung ausgelegt, liegt der Fokus neuer Fahrzeuggenerationen darin die Systeme der aktiven und passiven Sicherheit stärker zu verbinden, um das Schutzpotenzial für alle Verkehrsteilnehmer zu erhöhen (Kramer 2012, Kapitel 1). Ziel der sogenannten integralen Sicherheit<sup>19</sup> ist es, über die Vernetzung und Abstimmung zwischen Einzelsystemen eine zusätzliche Erhöhung der individuell erreichbaren Schutzwirkung zu erzielen.<sup>20</sup> Dabei wird der gesamte Hergang von der Entstehung über die Kollision bis hin zur Rettung untersucht und optimiert. Allen Systemen ist dabei gemein, dass sie versuchen einen Assistenzbedarf (Winner et al. 2012, Kapitel 1) beim Fahrzeugführer<sup>21</sup> zu decken. Dieser liegt vor allem darin, die Leistungsgrenzen menschlicher Wahrnehmung und Handlungsfähigkeit zu verbessern, um die Unfallentstehung zu vermeiden.

---

Effekt unterliegt. Vergleiche dazu Evans (1995) am Beispiel der Markteinführung von ABS. Darüber hinaus ist beim modelljahrübergreifenden Vergleich der Effekt des Fahrzeugalters zu berücksichtigen. Vergleiche dazu Kahane (1989) am Beispiel der Markteinführung der 3. Bremsleuchte.

<sup>18</sup>Der Forschungsbericht der Unfallforschung der Versicherer kommt für generische Fahrerassistenzsysteme zu dem Ergebnis, dass diese grundsätzlich in der Lage sind Unfallhergang und Schaden positiv zu beeinflussen (Hummel et al. 2011). Die von der Hochschule Heilbronn durchgeführte wissenschaftliche Beurteilung der Aktion „SICHER. FÜR DICH. FÜR MICH.“ kommt zu dem Ergebnis, dass das Risiko der Unfallbeteiligung für Fahrzeuge (untersucht wurden nur Busse und Lkw), die mit Fahrerassistenzsystemen ausgestattet sind, „signifikant niedriger ist als dasjenige der Vergleichsfahrzeuge“ (Hautzinger et al. 2011). Das euroFOT Projekt kommt in der Analyse der durchgeführten Feldstudie mit Seriensystemen zu dem Ergebnis, dass insbesondere automatische Abstandstempomaten und Notbrems- und Kollisionswarnsysteme einen positiven Effekt haben (Malta et al. 2012). Vorhergehende Untersuchungen des TRACE Projekts (Bayly et al. 2007) oder der OECD (OECD 2003) weisen für diese Systeme ebenfalls eine positive Wirkung auf die Verkehrssicherheit aus.

<sup>19</sup>Die integrale Sicherheit bezeichnet die Kombination und Vernetzung von Maßnahmen zur Unfallvorbeugung und Unfallfolgenmilderung (Gonter et al. 2011, Abschnitt 9.9).

<sup>20</sup>Anzumerken bleibt, dass aus heutiger Sicht für aktive und passive Systeme ein individueller statistischer Nutzen (je nach System) nachgewiesen werden kann. Bisher sind keine Untersuchungen bekannt, die eine Effektivität im Feld durch die Kombination von aktiven mit passiven Systemen nachweisen.

<sup>21</sup>Wenn im folgenden Text vom Fahrer gesprochen wird, ist damit der Fahrzeugführer bzw. die Fahrzeugführerin gemeint. Vereinfachend wird nur das generische Maskulinum verwendet.

---

Radarbasierte Notbremsassistenten waren die ersten Systeme mit maschineller Umfeldwahrnehmung, die durch einen aktiven Eingriff in die Fahrzeugaktuatorik nicht nur einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Einzelfall für die Insassen des eigenen Kraftfahrzeugs, sondern für alle an einem Unfall beteiligten Personen im Rahmen ihrer Systemgrenzen leisten konnten. Diese Systeme sind in der Lage in Längsverkehrsszenarien durch eine Teil- bzw. Vollbremsung<sup>22</sup> eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit zu bewirken. Voraussetzung für die Zulassungsfähigkeit dieser Systeme ist dabei die allgemeine Gültigkeit des Handlungskonzeptes<sup>23</sup>, bei dem die Unfallfolgen einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision im Längsverkehr durch eine verminderte Kollisionsgeschwindigkeit für alle Beteiligten geringer, mindestens aber nicht gravierender, sind.<sup>24</sup>

An ihre Grenze stoßen diese Handlungskonzepte in komplexeren Verkehrssituationen. Maßgebliches Problem ist dabei die abstrahierte und unvollständige Repräsentation des Umfeldes, die maschinell nicht in gleicher Güte und Vollständigkeit wie durch den Menschen bewertet werden kann (Maurer 2012b). Auch das Bewerten von Fahrerhandlungen und wie diese zu interpretieren bzw. optimal zu unterstützen sind, stellt automatische Systeme vor eine große Herausforderung.<sup>25</sup> Diese Unvollständigkeit in Kombination mit der Unsicherheit bezüglich der Fahrerintention führt zumeist zu einer Deaktivierung oder konservativen Parametrierung von Fahrerassistenzfunktionen.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Findung einer differenzierteren Eingriffshandlung. Dabei unterscheiden sich diese von bisherigen Systemen dadurch, dass die Auswirkungen aller möglichen Handlungen unter Berück-

---

<sup>22</sup>Schöneburg (2010) schreibt, dass „in der neuen E-Klasse und der modellgepflegten S-Klasse etwa 600 ms vor dem zu erwartenden Aufprall auf ein Hindernis eine automatische Vollbremsung eingeleitet wird“.

<sup>23</sup>Die in dieser Arbeit verwendete Definition des Begriffs 'Handlungskonzept' erfolgt im nächsten Abschnitt.

<sup>24</sup>Eine vertiefende Erklärung dieser Problematik wird in Abschnitt 3.5 gegeben.

<sup>25</sup>Zahlreiche Arbeiten auf dem Gebiet der Fahrermodelle versuchen Konzepte zur Mensch-Maschine-Interaktion modellhaft abzubilden. Bisher war ein Fokus die Untersuchung der Fahrerreaktion auf Warnungen und automatische Eingriffe. Eine umfassende Übersicht der verschiedenen Konzepte (Reaktionszeit-, Taskmodelle etc.) findet sich in Plöchl & Edelmann (2007) und Bauer (2012).

sichtigung der aktuellen Verkehrssituation bewertet werden. Anhand dieser Bewertung kann eine optimale Handlung gewählt und mittels entsprechender Aktorik realisiert werden. Einer Beschränkung auf Warnungen und Bremsenriffe unterliegt dieses Konzept nicht. Vielmehr erlaubt es ein fein granulares Abwägen der unterschiedlichen Eingriffsformen und kombiniert erstmals automatische Lenk- und Bremsenriffe zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr.

## **1.1 Begriffsdefinition**

Für ein besseres Verständnis des Titels und der Zielsetzung sollen die zwei maßgeblichen Begrifflichkeiten 'Handlungskonzept' und 'Querverkehr' gleich zu Beginn hergeleitet und für den Rahmen dieser Arbeit beschrieben werden. Damit bleibt es unerlässlich den Begriff der Fahrgastzelle ebenfalls zu definieren.

### **1.1.1 Handlungskonzept**

Der Begriff 'Handlungskonzept' ist von seiner Bedeutung her zunächst unpräzise. Die Handlung sei als „bewusst ausgeführte Tat“ als Teil eines „klar umrissenen Plans“ bzw. „Programms für ein Vorhaben“ zu verstehen (Dudenredaktion 1999). Ein Handlungskonzept beschreibt damit die Eingriffsmöglichkeiten eines Assistenzsystems für gegebene Verkehrssituationen.<sup>26</sup> Die Formulierung kann dabei in unterschiedlicher Form erfolgen.

Diese Arbeit beschreibt für eine eingeschränkte Menge an Verkehrskonflikten<sup>27</sup> mit kreuzendem Verkehr die Möglichkeiten für ein Assistenzsys-

---

<sup>26</sup>Eine Verkehrssituation ist nach der Definition von Mock-Hecker (1994, Kapitel 1): „Eine Verkehrssituation ist dabei der zu einem bestimmten Zeitpunkt existierende Zustand des erfassten Ausschnitts der Verkehrswelt, der in dem hier verfolgten Ansatz durch bestimmte physikalische Zustandsgrößen der involvierten Fahrzeuge, den zu diesem Zeitpunkt von den Fahrzeugen durchgeführten Aktionen und den erwarteten Plänen der Agenten beschrieben wird.“ Maurer (2000, Kapitel 6.2) erweitert diese Definition um die „Umstände, die für die Ausführung der aktuellen Aufgabe im jeweiligen Moment relevant sind“, also das Auswählen einer geeigneten Handlung (Heck 2009, Kapitel 2.2).

<sup>27</sup>Gstalter (1983, Kapitel 3.2) definiert einen Verkehrskonflikt als „eine beobachtbare Situation, in der Verkehrsteilnehmer sich räumlich oder zeitlich so annähern, daß eine erhöhte Kol-

tem zum Eingreifen durch Warnungen, Bremsen und Lenken. Ziel ist es die zu erwartende medizinische Unfallschwere positiv zu beeinflussen. Die Formulierung erfolgt dabei in Form einer Empfehlung, welche Handlungen sich günstig auf die zu erwartende medizinische Unfallschwere auswirken können. Diese Empfehlungen wurden in einer weiteren Form algorithmisch im Versuchsträger umgesetzt.

### 1.1.2 Querverkehr

Verkehrskonflikte können anhand der beteiligten Verkehrsteilnehmer und der vorherigen Verkehrsvorgänge unterschieden werden. Es existieren verschiedene Einteilungen von Unfallarten in sogenannte Unfalltypen. In der German In-Depth Accident Study (GIDAS)<sup>28</sup> werden sieben Haupttypen<sup>29</sup> unterschieden.<sup>30</sup> Dabei sind die Unfallursachen und die Art wie die Verkehrsteilnehmer kollidieren unerheblich und gehen nicht in die Typisierung ein. Sieht man von Unfällen mit Fußgängern, Radfahrern, beziehungsweise Sonstigen ab, ergeben sich vereinfacht fünf grundlegende Typen der Fahrzeug-

---

lisionsgefahr besteht, wenn sich ihre Annäherung nicht ändert.“ Naab & Reichart (1998) ergänzen, dass einem Unfall ein Verkehrskonflikt mit unterlassener oder nicht erfolgreicher Vermeidungshandlung vorausgeht. Dies ist analog zu Mock-Hecker (1994, Kapitel 1), der eine kritische Verkehrssituation über die Notwendigkeit eines Eingriffs definiert, um damit einen Unfall auszuschließen bzw. das Risiko dafür zu vermindern. Vergleiche auch das „generisches Fehlerbaummodell der Unfallentstehung“ in Reichart (1999, Kapitel 3.2).

<sup>28</sup>GIDAS ist ein Kooperationsprojekt, dass 1999 aus diversen unabhängigen Bestrebungen zur Erhebung von Unfalldaten in zwei Erhebungsgebieten in Deutschland hervorgegangen ist. Es werden derzeit jährlich ca. 2000 Unfälle ausführlich erfasst, die für die Erhebungsräume repräsentativ sind und bezüglich diverser Merkmale, beispielsweise des Kollisionsablaufs, bundesweit als repräsentativ gewertet werden (Otte et al. 2003; Hautzinger et al. 2005). Anzumerken bleibt, dass die GIDAS Aktualisierung nach Erscheinen der Unfallzahlen-Monatsberichte des statistischen Bundesamts erfolgt. Es ist daher anzunehmen, dass mehr Unfälle erfasst werden als tatsächlich in die GIDAS aufgenommen werden.

<sup>29</sup>Die Unfalltypen sind erstmalig vom HUK-Verband 1973 festgelegt und von Schilberg (1973) beschrieben worden. Die sieben Unfalltypen sind: Fahrnfall, Abbiegeunfall, Einbiegen-/Kreuzen-Unfall, Überschreiten-Unfall, Unfall durch ruhenden Verkehr, Unfall im Längsverkehr und sonstiger Unfall.

<sup>30</sup>Fahr-, Abbiege-, Einbiegen-/Kreuzen-, Überschreitungsunfall sowie Unfälle im ruhenden Verkehr, im Längsverkehr und sonstige Unfälle werden unterschieden. Vergleiche GDV (1998) für eine genaue Auflistung und Beschreibung zur Kategorisierung der einzelnen Typen.

Fahrzeug Unfälle: Fahr-, Längs-, Abbiege-, Gegen- und Querverkehrsunfälle. Die in dieser Arbeit untersuchten Gefahrensituationen führen zu Unfällen, die in GIDAS als Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle, vereinfacht Querverkehrsunfälle, beschrieben werden. Wenn in dieser Arbeit verallgemeinernd von Querverkehr gesprochen wird, sind damit Verkehrskonflikte gemeint, bei denen sich die Fahrwege zweier Automobile so kreuzen, dass ein Fahrzeug mit seiner Front in die Seite des anderen Fahrzeugs fährt. Diese Situationen treten im Bereich von Kreuzungen auf und sind im Allgemeinen auf die Missachtung der Verkehrsregeln<sup>31</sup> von mindestens einem Fahrzeug zurückzuführen.<sup>32</sup>

### 1.1.3 Fahrgastzelle

Von zentraler Bedeutung für die Fahrzeugsicherheit ist die Fahrgastzelle. In der Literatur wird der Begriff mit unterschiedlicher Definition verwendet. Es existiert eine Vielzahl an synonym verwendeten Wörtern wie: Fahrzeugzelle, Sicherheitszelle, Fahrgastzelle, Passagierzelle oder Fahrgast(innen)raum. Auch die gängigen Normen DIN 70020 (1993) und SAE J1100 (2009) zur Bezeichnung von Abmessungen geben keine genaue Definition.<sup>33</sup> Als Erfinder der Fahrgastzelle für einen Automobilhersteller kann Béla Barényi bezeichnet werden. In seiner Patentschrift von 1951 beschreibt er ein „Kraftfahrzeug in Zellenbauweise [...] so konstruiert, daß die Endzellen eine geringere Stoß- oder Beulenfestigkeit haben als die Mittelzelle“, mit dem Zweck, dass „die

---

<sup>31</sup>Elvik (2006) reduziert die Vielzahl der Risikofaktoren, die zu Unfällen führen, auf vier allgemeingültige „Laws of accident causation“.

<sup>32</sup>Eine Betrachtung der Unfallursachen und Unfallanalyse für Querverkehrsunfälle anhand von GIDAS wird in Abschnitt 3.2.1 durchgeführt.

<sup>33</sup>Die grundlegende Überlegung besteht darin die Sicherheit für die Insassen eines Fahrzeugs zu erhöhen, indem die Struktur des Fahrzeugs so robust konstruiert wird, dass im Falle eines Unfalls der Innenraum nicht auseinanderfällt oder zerdrückt wird. Hugh DeHaven, der nach einem überlebten Flugzeugunfall (1917) Überlegungen zu einer „crashworthy structure“ angestellt hat, wird von Nader (1965) als Erfinder der Sicherheitszelle beschrieben. Erst durch sein jahrelanges Engagement wurde die Idee der verbesserten Insassenankopplung und Sicherheitszelle in Flugzeugen und später in Fahrzeugen aufgegriffen (Nader 1965, Kapitel 3). Vergleiche auch DeHaven (1942) und Haddon, Jr. et al. (1964, Kapitel 9).



in ihm untergebrachten Personen bei Zusammenstößen oder Unfällen weitgehend geschützt sind“ (Barényi 1952).<sup>34</sup>

Gesamtwerte zur Fahrzeugtechnik wie Braess & Seiffert (2011, Kapitel 6.4) diskutieren den Begriff Fahrgastinnenraum häufig unter dem Aspekt der Ergonomie bezüglich seiner Anforderungen auf Platz- und Sichtverhältnisse sowie der verwendeten Fertigungstechnik. Unter dem Aspekt der Sicherheit werden oftmals einzelne Anforderungen hinsichtlich bestehender Testverfahren, nicht aber eine Definition gegeben.<sup>35</sup> Riedel (2011) definiert die Fahrgastzelle hinsichtlich der Sicherheit umschreibend als „Innenraum des Kraftfahrzeugs, dessen Ausgestaltung für den Komfort und Insassenschutz maßgebend ist“. Er schreibt weiter: „Dazu gehören Deformationsverhalten der Karosserie, Festigkeit der Fahrgastzelle, d.h. Größe des Überlebensraums während und nach dem Aufprall [...]“, ohne konkrete Bezugspunkte zur Fahrzeugstruktur zu benennen.

Eine implizite Definition der Abmessungen ergibt sich aus Grabner & Notthaft (2006, Kapitel 25), die als abgrenzende Bauteile Stirnwand, A- bis C- bzw. D-Säule und Dach beschreiben. Analog sind auch die zeichnerischen Angaben in Pippert (1993) zu verstehen. Eine Auflistung der Bestandteile und Komponenten der Fahrgastzelle, wie sie in den genannten Konstruktionsbüchern vorliegt, erscheint zur Übernahme in eine Norm zumindest diskussionswürdig. Aufgrund der Vielzahl am Markt verfügbarer und technisch denkbarer Fahrzeugkonzepte könnte durch eine Normung eine einschränkende Wirkung für zukünftige Konzepte entstehen. Andererseits würde dies eine explizite Formulierung von Sicherheitsanforderungen ermöglichen, die von allen Marktteilnehmern eingehalten werden müsste.

Für diese Arbeit ist insbesondere das Deformationsverhalten bei einer Seitenkollision auf Höhe der Insassen von Interesse. Um den gesamten Fahrgastinnenraum von der sicherheitsrelevanten Fahrgastzelle zu differenzieren wird für diese Arbeit verallgemeinernd definiert:

---

<sup>34</sup> Sollte dies anfänglich noch durch eine hohe Festigkeit und Sollbruchstellen zu den äußeren Zellen erreicht werden, ergänzt Barényi (1969) den Zweck, um Stoßenergie in den äußeren Zellen in Deformationsarbeit umzusetzen und so eine Beschädigung der Mittelzelle zu vermeiden „und damit vor allem die Insassen des Kraftfahrzeugs vor körperlichen Schäden zu bewahren“ (Barényi 1969).

<sup>35</sup> Vergleiche Braess & Seiffert (2011, Kapitel 9).

*Die Fahrgastzelle ist der Raum, der von der Stirnwand bis zur letzten vertikalen, tragenden Struktur (C- bzw. D-Säule) geht und durch Dach bzw. Unterboden begrenzt wird.*

Vereinfachend kann angenommen werden, dass der schützenswerte Raum bezüglich einer Deformation zwischen Pedalpunkt und der Rücklehne der hintersten belegten Sitzreihe liegt. Die hinterste belegte Rücklehne liegt im Regelfall auf oder vor Höhe der C-Säule.

Es gibt jedoch eine Anzahl an Fahrzeugen, die mehr als eine Rücksitzbank haben. Diese befinden sich dann zwischen C- und D-Säule. Im Falle von Kleinbussen können diese sogar zwischen einer Reihe an weiteren vertikal tragenden Strukturen bis zum abschließenden vertikalen Strukturelement der Fahrgastzelle angeordnet sein. Bauartbedingt wird der normalerweise hinter der Fahrgastzelle beginnende Hinterwagen und Gepäckraum sehr klein oder kann wahlweise als Sitzplatz genutzt werden. Insgesamt machen Fahrzeuge dieser Bauart nur einen kleinen Teil des Fahrzeugbestands in Deutschland aus<sup>36</sup>. Zudem sind insbesondere die hinteren Rücksitzreihen selten besetzt<sup>37</sup>. Im Falle der Seitenkollision variiert die Steifigkeit je nach Fahrzeugmodell in diesem Bereich stark. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen wird davon ausgegangen, dass die Seitensteifigkeit im Bereich der Hinterachse, unabhängig von der Fahrgastzellenlänge, am größten ist.

Daher wird vereinfachend für diese Arbeit angenommen, dass der seitliche, schützenswerte Bereich der Fahrgastzelle der Raum ist, der vom Pedalpunkt bis zur C-Säule geht. Der Umgang mit weiteren Sitzreihen in (Mini-)Vans

---

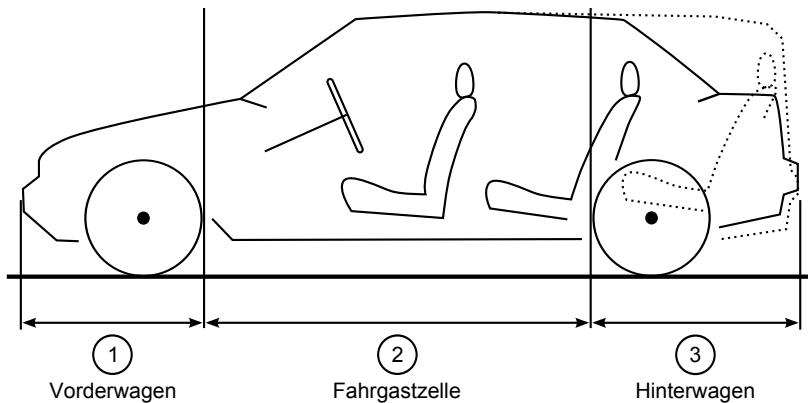
<sup>36</sup>Nach Angaben des Kraftfahrtbundesamtes wurden 2011 in den Klassen: Mini-Vans, Großraum-Vans und Utilities 507.701 Fahrzeuge zugelassen. Das entspricht 16 % der Neuzulassungen in 2011 (KBA 2011).

<sup>37</sup>Kulowski (1960, Kapitel 2) gibt die Belegung außerhalb der ersten beiden Sitzreihen mit 5 % an. Evans (2004, Kapitel 3) wertet die FARS (Fatality Analysis Reporting System) Datenbank nach getöteten Insassen und ihrer Sitzpositionen in 2001 aus. Er merkt an, dass es für Fahrzeuge, die nicht verunfallen, keine zuverlässige Quelle gibt, die die Verteilung der Insassen auf die möglichen Sitzpositionen angibt. In seiner Auswertung sitzen 91 % der Insassen in der 1. Sitzreihe und 8 % in der 2. Sitzreihe. Vergleiche auch Evans (1988), Smith & Cummings (2004), Mayrose & Priya (2008) die jeweils ein deutlich reduziertes Risiko für die 2. Sitzreihe aufweisen. Als weiterer Indikator kann dafür dienen, dass im Rahmen der GIDAS bisher kein Unfall erhoben wurde, bei dem Insassen in einer 3. Sitzreihe zu Schaden gekommen sind.

wird in Kapitel 3 intensiver diskutiert. Dafür wird eine Lösung vorgeschlagen, wie das Handlungskonzept angepasst werden muss, um diesen Bereich bestmöglich zu schützen. Ferner wird angenommen, dass sich dieser Bereich stets zwischen den beiden Achsen befindet. Wenn im Folgenden von Fahrgastzelle gesprochen wird, ist folglich diese eingeschränkte Definition gemeint. Sie dient der vereinfachten Beschreibung von seitlichen Trefferlagen<sup>38</sup>, bei denen differenziert werden soll, ob sie im Bereich des Vorderwagens, der Fahrgastzelle oder des Hinterwagens erfolgen. Abbildung 1.4 stellt die drei Bereiche dar. Die Grenze wird durch die jeweilige Achse bestimmt. Aufgrund der belastbaren Verbindung zwischen Felge, Radaufnahme, Aufhängung und Achse wird der durch die Felge abgedeckte Bereich zum Vorder- bzw. Hinterwagen gezählt.

---

<sup>38</sup>Unter dem Begriff Trefferlage ist die in GIDAS als Kollisionskonstellation bezeichnete Position der beiden Fahrzeuge im Moment der ersten Berührung gemeint. Anzumerken ist, dass diese Stelle nicht mit der tiefsten Intrusion übereinstimmen muss. Die tiefste Intrusion ist für die Verletzungsrisiken maßgeblich. Daher wurden für diese Arbeit die von Volkswagen korrigierten GIDAS Abzüge genommen. Nach einer internen und daher vertraulichen Methodik von Holger Becker, Michael Stanzel und Dr. Stefanie Achmus wird der Unterschied zwischen 1. Trefferlage und tiefster Trefferlage plausibilisiert und ausgewiesen. Häufig wird der tiefste Punkt bei der Auswertung der GIDAS als Trefferlage angegeben. Aufgrund der Vielzahl der im Feld vorhandenen Fahrzeuge und deren unterschiedlicher Kompatibilität bzw. bei Stößen mit unterschiedlichen Winkeln kann ein Fahrerassistenzsystem zurzeit keine Vorhersage über den tiefsten Punkt der Intrusion treffen. Abschnitt 3.1 beschreibt die Auswirkungen der ersten Berührung auf die Tiefe der Intrusion.



**Abbildung 1.4:** Definition der drei seitlichen Fahrzeugbereiche für diese Arbeit. Gepunktet ist ein Fahrzeug mit 3. Sitzreihe angedeutet.

## 1.2 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

In dieser Arbeit wird ein gesamtes System zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr für Pkw-Pkw-Kollisionen vorgestellt. Der wesentliche Bestandteil besteht in der Beschreibung der Anforderungen an das zugrunde liegende Handlungskonzept. Hierbei geht es vor allem darum die Auswirkungen und das Potenzial von automatischen Eingriffen für Kollisionen mit querendem Verkehr zu untersuchen. Bei einem automatischen Eingriff muss sichergestellt sein, dass es dadurch zu keiner Verschlechterung der Unfallfolgen für die Beteiligten kommen kann.<sup>39</sup>

Systeme für den Einsatz im Längsverkehr beeinflussen die technische Unfallschwere durch eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit und erreichen darüber eine Verringerung der Energie des Aufpralls (Kopischke 2000, Kapitel 8). Eine situative Abwägung, ob durch den Eingriff eine Veränderung der Unfallfolgen stattfindet, wird nicht vorgenommen. Es wird angenommen,

---

<sup>39</sup>Vergleiche Klindt & Handorn (2010) bzw. Abschnitt 3.5.

dass bei gleicher Trefferlage<sup>40</sup> durch den Energieabbau der Bremsung eine Reduktion der technischen Unfallschwere eintritt (Winner 2012, Kapitel 33.6). Ist diese Energiereduktion hinreichend groß, sinkt die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v$ )<sup>41</sup>. Als Folge wird angenommen, dass auch die medizinische Unfallschwere reduziert oder zumindest nicht verschlechtert wird.<sup>42</sup> Im günstigsten Fall kann eine Kollision vermieden werden (Busch 2004, Kapitel 7.3). Kritisch sind hierbei mögliche Kollisionen mit nachfolgendem Verkehr. Diese können bei Unachtsamkeit des folgenden Verkehrs bedingt durch die spontanen, starken Verzögerungen auftreten. Die Systeme sind daher entweder generell in ihrer maximalen Verzögerung begrenzt oder berücksichtigen den rückwärtigen Verkehrsraum vor einer Auslösung.<sup>43</sup>

Im Querverkehr gelten diese für den Längsverkehr getroffenen Annahmen nicht. Durch einen Bremseneingriff kommt es implizit zu einer Veränderung des Kollisionspunktes zwischen den Fahrzeugen. Durch diese Verschiebung kann es zu einer Erhöhung der Unfallschwere kommen. Daher muss eine genaue Betrachtung der möglichen Auswirkungen von Eingriffen im Voraus stattfinden. Das vorgeschlagene Handlungskonzept ist eine Erweiterung bisheriger Arbeiten zur Unfallfolgenminderung, die diesen Umstand nicht berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit werden zuerst die Randbedingungen und Anforderungen betrachtet, um ein Handlungskonzept zu erstellen, anhand dessen ein abgewogener Noteingriff geplant und durchgeführt werden kann. Voraussetzung für diese Eingriffe ist ein detailliertes Verständnis über die Auswirkungen auf die Unfallschwere. Die praktische Umsetzung erfordert eine mög-

---

<sup>40</sup>Eine wesentliche Änderung der Trefferlage durch den automatischen Bremseneingriff kann nahezu ausgeschlossen werden. Wesentlich bedeutet in diesem Fall, dass die medizinischen Unfallfolgen zwischen der ursprünglichen und der durch den Bremseneingriff resultierenden Trefferlage alleine aufgrund der Trefferlage deutlich voneinander abweichen. Begründet werden kann dies über die Annahmen im Längsverkehr, bei denen die Fahrzeuge hintereinander herfahren oder direkt auf ein stehendes Hindernis auffahren. Da kein Lenkeingriff stattfindet, könnte der Fahrer zudem durch Lenkung das Fahrzeug weiterhin aktiv positionieren.

<sup>41</sup>Die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  steht als Vereinfachung für den eigentlich gemeinten Beitrag der vektoriellen Geschwindigkeitsänderung  $|\Delta \vec{v}|$  in der Kollision. Vergleiche Elvik et al. (2009, Part III-2). Im Folgenden vereinfachend als  $\Delta v$  bezeichnet.

<sup>42</sup>Vergleiche beispielsweise O'Brien (2010, Kapitel 4.3).

<sup>43</sup>Vergleiche beispielsweise Maurer (2012b, Kapitel 4.4.3).

lichst präzise maschinelle Wahrnehmung der Umwelt des Kraftfahrzeugs. Dafür werden basierend auf dem entwickelten Unfallschweremodell Anforderungen für eine auf Bildverarbeitung basierende Wahrnehmung sowie die Fahrzeugregelung abgeleitet.

Wichtig für die Entscheidungsfindung ist eine Bewertung der Eingriffsmöglichkeiten. Dabei muss ein Bewertungskriterium gefunden werden, das deterministisch berechnet werden kann und eine eindeutige Entscheidung ermöglicht. Konzentrierten sich bisherige Ansätze auf eine Abstimmung zwischen Warnungen sowie Teil- und Vollbremsungen, erlaubt das hier zugrundeliegende System eine zusätzliche Berücksichtigung und Planung von Lenkeingriffen. Die Kombination von Brems- und Lenkeingriffen bei Eingriffen in der Pre-Crash Phase erfordert eine genaue Betrachtung ihrer Auswirkungen auf die Fahrerhandlung. Dazu wurde eine Probandenstudie mit kombiniertem Notbrems- und Lenkeingriff vor einer unvermeidbaren Kollision im Querverkehr durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse stellen einen weiteren Beitrag der Arbeit dar und fanden Eingang in die Entwicklung des Handlungskonzepts.

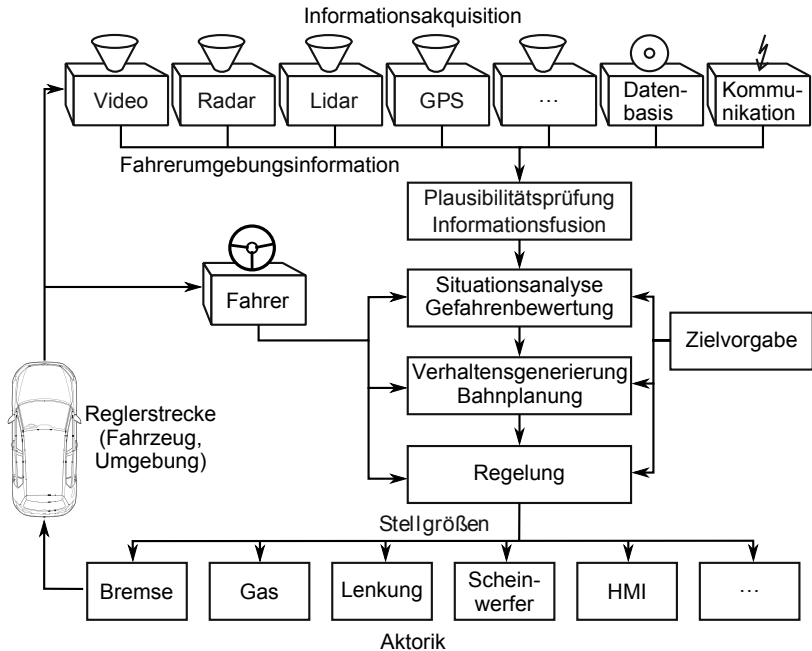
Eine praktische Umsetzung des Handlungskonzepts konnte abschließend erfolgreich im Versuchsträger gezeigt werden. Die Implementierung der Wahrnehmung und Regelung dafür war nicht Gegenstand der Arbeit. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Center for Machine Perception, Department of Cybernetics der Technischen Universität Prag, ist eine kostengünstige Bildverarbeitungslösung entstanden.<sup>44</sup> Im Reifegrad eines Forschungsansatzes erfüllt diese einen Großteil der Anforderungen, wie im praktischen Versuch gezeigt werden konnte.

Zur regelungstechnischen Durchführung wurde ein einfacher Ansatz gewählt. Die Architektur des entstandenen Fahrerassistenzsystems ist durch den Rückgriff auf den in der Volkswagen Konzernforschung genutzten modularen Fahrerassistenzbaukasten geprägt. Zur Handlungsfindung und Steuerung wird ein Ansatz vorgestellt, der die Regelungsebene der Volkswagen Architektur verwendet.

Abbildung 1.5 stellt ein generisches Systemdiagramm für Fahrerassistenzsysteme dar. Nach diesem Modell von Stiller (2005) leistet diese Arbeit einen

---

<sup>44</sup>Vergleiche Heck et al. (2012b), Heck et al. (2013) und Sychrovský et al. (2013a).



**Abbildung 1.5:** Systemdiagramm von Fahrerassistenzsystemen mit mehreren Rückkopplungen nach Stiller (2005)

Beitrag zu den Modulen der Gefahrenbewertung, Verhaltensgenerierung und Bahnplanung. Dabei werden die Anforderungen für eine konkrete Ausprägung zur praktischen Umsetzung für die Wahrnehmung sowie die Regelungsebene definiert.

Im Einzelnen ergeben sich daraus folgende Ziele für diese Arbeit:

- Entwicklung eines Handlungskonzepts zur Unfallfolgenminderung unvermeidbarer Pkw-Pkw-Kollisionen im Querverkehr. Inhärente Unsicherheiten, wie beispielsweise die zu erwartenden Fahrerhandlungen oder die Handlungsmöglichkeiten des Umfeldes, müssen darin berücksichtigt werden. Für einen automatischen Eingriff muss garantiert wer-

den, dass keine am Unfall beteiligte Person durch einen Systemeingriff schwerer verletzt wird als ohne automatischen Eingriff.

- Definition von Anforderungen für die maschinelle Wahrnehmung und Regelung zur praktischen Umsetzung des Handlungskonzepts im Kraftfahrzeug.
- Verifikation des Handlungskonzepts im Probandenversuch bezüglich der zu erwartenden Fahrerreaktionen anhand einer repräsentativen Studie.
- Prototypische Umsetzung des Handlungskonzepts im Versuchsträger und Bestimmung der erreichten Systemgenauigkeiten.<sup>45</sup>

## **1.3 Inhaltliche Gliederung der Arbeit**

Nach der Betrachtung der grundlegenden Bedeutung aktiver Fahrerassistenzsysteme für die Verkehrssicherheit in diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik (Kapitel 2) gegeben. Ausgehend von der Entwicklung der aktiven und passiven Sicherheit zur integralen Sicherheit (Abschnitt 2.2) werden bisherige Konzepte zur Kritikalitätsberechnung und Unfallschwereprognose beschrieben (Abschnitt 2.3). Die zugrundeliegende Systemarchitektur und eine kritische Würdigung des Entwicklungsprozesses nach Maurer erfolgen in Abschnitt 2.4. Abschnitt 2.5 fasst die bisher vorgestellten Arbeiten im Bereich der Kreuzungsassistenten zusammen, um den bisherigen Stand der Forschung aufzuzeigen.

---

<sup>45</sup>Diese Arbeit verwendet die Begriffe Richtigkeit und Präzision, um die Genauigkeit zu beschreiben, und orientiert sich dabei an den Definitionen der ISO 5725-1 (1997). Die „Präzision ist die allgemeine Benennung für die Streuung zwischen [...] wiederholten Messungen“. Die angegebenen Messreihen wurden, soweit kontrollierbar, unter Wiederholbedingungen durchgeführt. In der Arbeit wird jedoch nicht genauer auf die Wiederhol- und Vergleichsbedingungen eingegangen. Die Richtigkeit ist die Abweichung zwischen anerkanntem Bezugswert und der durch das Messverfahren gelieferten Ergebnisse. Der Ausdruck Genauigkeit „bezieht sich auf beides, auf Richtigkeit und Präzision“. Dabei wird sowohl die Genauigkeit von Messverfahren (Messwert zur Referenzmessung) wie auch die Genauigkeit der erreichten Fahrzeugposition (gemessene Positionsabweichung zur Soll-Referenzposition) beurteilt. Vergleiche ISO 5725-1 (1997).



Teil II dieser Arbeit stellt ein Handlungskonzept für ein System zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr vor. Der mögliche Nutzen eines solchen Systems und Einschränkungen durch Randbedingungen werden in Kapitel 3 beschrieben. Das Ziel ist es die Anforderungen für Fahrerassistenzsysteme auf diesem neuen Gebiet der Kreuzungsassistenz zu definieren. Ausgehend von einer Analyse des bundesdeutschen Unfallgeschehens wird ein mögliches Wirkfeld errechnet. Dieses ist als theoretisch maximal erreichbares Ziel zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu verstehen und wird durch zu beachtende Randbedingungen in den folgenden Unterkapiteln eingeschränkt. Die Einschränkungen resultieren aus den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Potenzialen der maschinellen Wahrnehmung und Fahrzeugaktorik sowie zu beachtender Unsicherheiten durch den Handlungsraum des Fahrers. In Abschnitt 3.5 werden die Aspekte der rechtlichen Anforderungen an ein solches System nach heutigem Stand behandelt. Abschließend wird eine Gefahren- und Risikoanalyse für eine mögliche Umsetzung vorgestellt. Diese schon im Rahmen einer Forschungsarbeit durchzuführen hat den Hintergrund frühzeitig mögliche daraus resultierende Fragestellungen zu untersuchen und zu berücksichtigen. Grundlegende Fragestellungen zu den stetig steigenden Möglichkeiten zu Eingriffen im Straßenverkehr durch Fahrerassistenzsysteme werden in Abschnitt 3.5 aus rechtlicher Perspektive diskutiert. Roboter-Ethik ist in den vergangenen Jahren stärker in den Fokus der Forschung gerückt. Eine ethische Einordnung der Trefferlagenänderung und die damit verbundenen Konsequenzen werden in Abschnitt 3.6 besprochen.

Aufbauend darauf wird in Kapitel 4 eine konsistente Funktionsdefinition dieses Handlungskonzepts vorgestellt. Der dargestellte Handlungsablauf (Abschnitt 4.1) beschreibt eine Funktion von erster Warnung (Abschnitt 4.1.1) bis zu einem automatischen Eingriff, analog zu bekannten Funktionen für den Längsverkehr (Abschnitt 4.1.2). Die Eingriffe haben als Ziel die prognostizierte Verletzungsschwere aller am Unfall beteiligten Verkehrsteilnehmer zu minimieren. Es werden drei mögliche Trefferlagen diskutiert und gezeigt, wie diese positiv beeinflusst werden können. Dazu werden in Abschnitt 4.1.3 auch die möglichen Auswirkungen auf das Auslaufverhalten nach der Kollision für die am Unfall beteiligten Kollisionspartner untersucht. Wesentlich für die Eingriffsentscheidung (Abschnitt 4.2) ist, dass nicht mehr feste Kritikalitätsmaße verwendet werden, sondern eine Risikoabschätzung, anhand derer

die Verletzungswahrscheinlichkeit aller am Unfall beteiligten Verkehrsteilnehmer gemessen wird. Für die praktische Umsetzung werden die zu berücksichtigenden Unsicherheiten erörtert. Mögliche Auslösekriterien für dieses Verfahren und Abbruchbedingungen werden anhand der daraus resultierenden Folgen am Ende des Abschnitts diskutiert.

Die experimentelle Verifikation dieser Ausprägung und die Vorstellung von Studien zum Fahrerverhalten bilden Teil III der Arbeit. Dafür wurde die in Teil II beschriebene Systemausprägung prototypisch zur Erprobung in einem Versuchsträger implementiert. Zuerst werden die Ergebnisse aus der praktischen Erprobung in Abschnitt 5.1 vorgestellt. Bei der Erprobung im realen Fahrzeug wurde mittels eines Versuchsaufbaus die Performance der Sensorik und Aktorik überprüft, um die erreichte Genauigkeit zu bestimmen. Anhand von Probandenversuchen im statischen und dynamischen Simulator sowie einer Vehicle in the Loop Studie wurde das Verhalten der Fahrer auf Systemeingriffe in den zugrundeliegenden Verkehrskonflikten untersucht. Kapitel 6 enthält für die vorgestellte Ausprägung eine Effizienzabschätzung. Dazu wurde eine Berechnung mithilfe des rateEffect Tools durchgeführt. Eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungsschwerpunkte sowie eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse bilden den Abschluss der Arbeit in Kapitel 7.

# Kapitel 2

## Stand der Technik

Das Ziel von Fahrerassistenzsystemen ist es, den Fahrer bei seiner Fahraufgabe zu unterstützen. Damit tragen sie zu einer Erhöhung von Fahrkomfort bei und können im Einzelfall einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit leisten (Naab & Reichart 1998). Zur Spezifikation der Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem ist eine Klassifikation der verschiedenen Systeme vorteilhaft.

Die Fahraufgabe lässt sich nach Kompaß (2008, Abschnitt 2) in drei Ebenen unterteilen: *Planung*, *Führung* und *Stabilisierung*.<sup>1</sup> Die Ebenen unterscheiden sich insbesondere in der Dauer der ausgeführten Handlungen.<sup>2</sup> Kraiss & Hamacher (2001) unterscheiden zusätzlich die Art der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine. Handlungen werden dabei entweder *seriell*, *parallel* oder *redundant-parallel* abgearbeitet und ausgeführt. Kraiss (1998) bezeichnet letztere Form als „Assistenzfunktion“.<sup>3</sup> Naab & Reichart

---

<sup>1</sup>Rasmussen (1983) beschreibt die Fahraufgabe analog in seinem ebenfalls in 3-Ebenen eingeteilten Verhaltensmodell als wissensbasiertes Verhalten, regelbasiertes Verhalten und auf sensomotorischen Fertigkeiten basiertes Verhalten. Vergleiche Maurer (2000, Kapitel 3.1) für eine detaillierte Beschreibung in Bezug zu automatischen Fahrzeugen oder z.B. Johannsen (1993) für eine breitere Übersicht, auf den auch Maurer verweist.

<sup>2</sup>„Während auf Planungsebene die Handlungen für gewöhnlich im Bereich mehrerer Minuten ablaufen, werden für die Führungsebene Zeiträume im Bereich von Sekunden benötigt. Auf der Stabilisierungsebene dagegen laufen die Handlungen meist in wenigen Millisekunden ab.“ (Kompaß 2008, Abschnitt 2). Pöppel (2009) vergleicht die in der Literatur vorhandenen Experimente zur Einordnung von Verhalten in temporale Zeiträume. Er definiert für den zeitlich kürzesten Teil bewusster Handlungen (regelbasierte Ebene) einen Zeitraum von maximal 2-3 Sekunden. Diese werden zu komplexerer, bewussterer Handlung (wissensbasierte Ebene) zusammengefasst. Bei ihm wird dieser Prozess „pre-semantic temporal integration“ genannt.

<sup>3</sup>Vergleiche auch Maurer (2012a, Abschnitt 5.1).

(1998) unterscheiden Fahrerassistenzsysteme nach der Art der Fahrerunterstützung in vier Arten:

**Servosysteme**, die bei der Bedienung von Aktuatoren unterstützen oder Handlungen verstärken (z.B. Bremskraftverstärker).

**Informierende Systeme**, die zusätzliche Informationen zur Fahrzeugführung bereitstellen (z.B. Reifendrucksensoren).

**Automatisch intervenierende Systeme**, die ein 'erwartetes' bzw. leichter zu 'beherrschendes' Gesamtverhalten des Fahrzeugs erzeugen (z.B. ABS).

**Automatisch agierende Systeme**, die eine eigenständige 'Aktion' durchführen, entweder nach direkter Initiierung durch den Fahrer oder nach eigenständiger Interpretation des Fahrerwillens (z.B. Notbremssysteme).

Gasser et al. (2012, Kapitel 2) wählen eine Einteilung anhand der Automatisierungsgrade nach „maschinellem Leistungsfähigkeit“, um eine rechtliche Bewertung zu erleichtern. Insbesondere um die Verantwortungsverteilung zwischen Hersteller und Fahrer zu verdeutlichen, wird in fünf Stufen von herkömmlichem Fahren („driver only“) über die heute üblichen Assistenzsysteme („assistiert“) bis hin zum vollautomatisierten Fahren eingeordnet.

Abbildung 2.1 stellt den Übergang der Verantwortung bei zunehmender Automatisierung analog der Einordnung<sup>4</sup> durch die BAST Arbeitsgruppe grafisch dar. Deutlich wird der Zusammenhang, dass mit einem Anstieg der Assistenz und damit einer steigenden Verantwortung des Herstellers der Fahrer zunächst bis zur Teilautomatisierung eine dauerhafte Überwachung des Fahrzeugs und zusätzlich der Quer- und Längsführung durch das Assistenzsystem garantieren muss. Erst mit fortschreitender Automatisierung geht die Verantwortung soweit auf den Hersteller über, dass der Fahrer kontinuierlich aus der Überwachungsfunktion entlassen wird.<sup>5</sup>

Maurer (2012a, Abschnitt 5.1) reduziert diese Unterteilung auf „konventionelle Fahrerassistenzsysteme“ und „Fahrerassistenzsysteme mit maschineller

---

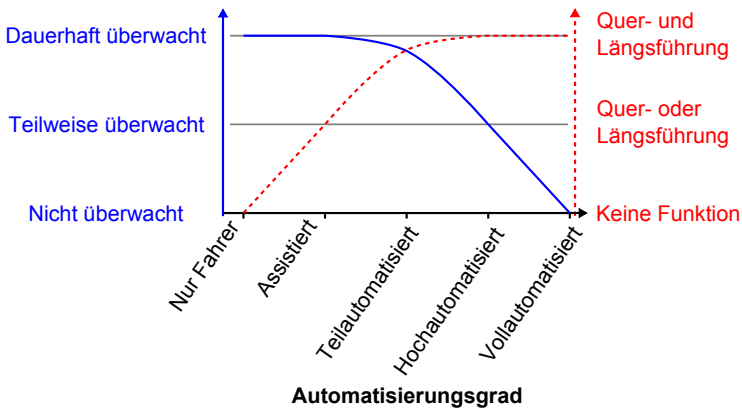
<sup>4</sup>Die Einordnung gilt noch als vorläufig.

<sup>5</sup>Lutz et al. (2013) stellen im Gegensatz dazu bei der Analyse des teleoperierten Fahrens fest, dass Schäden aufgrund fehlerhafter automatischer Eingriffe bzw. fehlerhafter Software für den Halter eines Fahrzeugs nur schwer gegenüber dem Hersteller zu belegen seien und stufen diese aus haftungsrechtlicher Sicht als „bedenklich“ ein.

---

**Dauer der Überwachung**

**Umfang der Unterstützung**



**Abbildung 2.1:** Benötigte Überwachung von Assistenzsystemen durch den Fahrer für steigende Automatisierungsgrade. Angelehnt an die vorläufige Einordnung in Gasser et al. (2012, Kapitel 2)

Wahrnehmung“. Die Differenzierung erfolgt dabei nach der Komplexität der Situation und wie schwer diese für das System messbar bzw. schätzbar ist. Konventionelle Fahrerassistenzsysteme unterstützen in einfachen Situationen, Fahrerassistenzsysteme mit „maschineller Wahrnehmung unterstützen“ in Situationen, die „als wahr angenommen werden müssen“. Der Unterschied beruht daher auf dem Umfang der maschinellen Interpretationsleistung, die auch zu einer Fehlinterpretation und folglich zu einer Fehlauslösung führen kann. Das in dieser Arbeit vorgestellte System wird als automatisch intervenierendes Fahrerassistenzsystem mit maschineller Wahrnehmung verstanden und im Folgenden vereinfacht als (Fahrerassistenz-)System bezeichnet.

Kramer (2009, Abschnitt 1.1) definiert einen Unfall als „ein Ereignis, bei dem die Abweichung zwischen vorgegebener Fahraufgabe und deren Erfüllung ein zulässiges Maß überschreitet (nicht bewältigte Regelaufgabe) und in

dessen unmittelbarer Folge ein Schaden<sup>6</sup> bestimmter Art und Schwere eintritt“.<sup>7</sup>

Gstalter (1983) beschreibt ein in der Fahrerassistenzforschung häufig verwendetes Modell zur Unfallentstehung<sup>8</sup>. Dabei entsteht ein Unfall aus einer kritischen Verkehrssituation heraus, die als „Verkehrskonflikt“<sup>9</sup> bezeichnet wird. Während des Verkehrskonflikts<sup>10</sup> hat wenigstens einer der am Unfall

---

<sup>6</sup>„Schaden (bzw. eine Schädigung): Ein Nachteil durch Verletzung von Rechtsgütern aufgrund eines bestimmten technischen Vorganges oder Zustandes.“ (Kramer 2009, Abschnitt 1.1).

<sup>7</sup>Der BGH bestätigt in seinem Urteil vom 15.11.2001 (4 StR 233/01) das StGB § 142 Abs. 1, das einen Unfall im Straßenverkehr als: „jedes Schadensereignis, in dem sich ein verkehrstypisches Unfallrisiko realisiert hat“ definiert. Ferner handelt es sich dabei um ein plötzlich eintretendes Ereignis, das von mindestens einem Beteiligten ungewollt ist und nicht einer deliktischen Handlung unterliegt. Die Definition von Kramer mag insofern unvollständig erscheinen, beschreibt aber treffend den Bereich, den die Fahrerassistenz zu schließen versucht.

<sup>8</sup>Das Modell von Gstalter ist in seiner Art abstrahierend und geht nicht auf alle Faktoren, die zum Unfall führen, ein. Reason (1990, Kapitel 7), der auf den Grundlagen von Rasmussen (1983) aufbaut, beschreibt ein komplexeres Modell, bei dem sich ein Unfall nur aus einem Fehler des Fahrers ergeben kann, nachdem vorher durch eine Wechselwirkung von Auslöseereignissen eine Unfallgelegenheit geschaffen wurde. Dabei differenziert er insbesondere die zur Gefährdung führenden Verhaltensweisen des Fahrers und unterscheidet zwischen intendierten und unintendierten Handlungen. Dabei wird erneut deutlich, dass Fehler nicht zwangsläufig zu Konflikten oder gar Unfällen führen. Zimmer (2001) beschreibt anhand des Modells der Fehlfunktion nach Rasmussen die Arten der Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung im Detail. Hacker (2005, Abschnitt 20.3) untersucht die Ursachen von Fehlhandlungen, die zu Unfällen führen und entwirft ein kombiniertes System aus den Modellen von Rasmussen und Reason zur Klassifikation der Ursachen von Verkehrsunfällen. Eine detaillierte Einführung in diese Modelle findet sich bei Gründl (2005).

<sup>9</sup>Diese Situationen werden auch als Gefahrensituationen bezeichnet. Vergleiche Mages et al. (2012, Abschnitt 37.2.3), Schmitt et al. (2007) und Winner (2012, Abschnitt 33.6.23).

<sup>10</sup>Gstalter (1983, Kapitel 3.2) definiert einen Verkehrskonflikt als „eine räumliche Situation, in der Verkehrsteilnehmer sich räumlich oder zeitlich so annähern, daß eine erhöhte Kollisionsgefahr besteht, wenn sich ihre Annäherung nicht ändert.“ Dabei wird das Vorliegen „durch kritische Manöver angezeigt, die das Ziel haben, bei erhöhter Kollisionsgefahr den Zusammenstoß zu vermeiden.“ Diese Manöver sind: „Bremsen, Beschleunigen, Ausweichen oder eine Kombination aus den genannten Manövern“. Burg (2009) definiert die Vermeidbarkeit genauer als: „Die Vermeidbarkeit kann räumlich und zeitlich gesehen werden: Bei der räumlichen Kollisionsvermeidung wird verlangt, dass das betreffende Fahrzeug vor dem Kollisionsort anhalten kann. [Eine räumliche Vermeidung kann theoretisch auch durch eine Beschleunigung bzw. ein Ausweichen erreicht werden.] Die zeitliche Vermeidbarkeit bedeutet, dass das eine Fahrzeug um so viel später am Kollisionsort eintrifft, dass der andere Verkehrsteilnehmer dessen Fahrkanal bereits vollständig verlassen hat.“

---

Beteiligten die Möglichkeit diesen noch zu vermeiden. Der Unfall folgt als Konsequenz aus einer unterlassenen, unzureichenden oder nicht erfolgreichen Vermeidungsreaktion bzw. in Fällen, bei denen eine Vermeidung nicht möglich ist.<sup>11</sup> Wenn entsprechende Systeme zur Prävention versagen oder nicht ausreichend wirksam werden, führt daher, analog zu Naab & Reichart (1998), ein Versagen von Mensch und/oder Maschine zu einem Unfall.

Fahrerassistenzsysteme bestimmen die Kritikalität des aktuellen Fahrzustands und der Verkehrssituation anhand von Sensordaten. Dafür berechnen sie die Gefährdung<sup>12</sup> für das eigene Fahrzeug anhand der Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit einem anderen Objekt.<sup>13</sup> Die Kritikalität ist in diesem Sinne nicht als Risikoangabe<sup>14</sup> im engeren Sinne zu verstehen, da eine Bewertung der Kollisionsfolgen und damit der zu erwartenden Unfallschwere nicht vorgenommen wird<sup>15</sup>. In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen und Auffassungen über die Definition der Unfallschwere. Ungelöst ist das Problem aus der „technisch“ beschreibbaren Kollision die genaue „medizinische“ Auswirkung in Form von resultierenden Verletzungen für die Insassen abzuleiten.<sup>16</sup> Niederer et al. (2001) geben drei Aspekte zur Klassifikation der Unfallschwere an:

**Fahrzeugtechnik:** Die technische bzw. mechanische Schwere einer Kollisi-

---

<sup>11</sup>Mehr als 99 % der registrierten Unfälle sind auf menschliches Versagen zurückzuführen (Mirwaldt et al. 2012; Stanton & Young 1998). Unaufmerksamkeit und geringe Fahrpraxis in Gefahrensituationen haben den größten Anteil an den Ursachen schwerer Verkehrsunfälle. Eine genaue Analyse der Ursachen für Querverkehrsunfälle erfolgt in Abschnitt 3.2.1.

<sup>12</sup>„Gefährdung: Eine räumlich und zeitlich sowie nach Art, Größe und Richtung bestimmte Gefahr für eine Sache, Person oder Funktion.“ (Kramer 2009, Abschnitt 1.1).

<sup>13</sup>Die Wahrscheinlichkeitsberechnung basiert auf einer Reihe von Annahmen, die in Abschnitt 2.3 näher beschrieben werden.

<sup>14</sup>„Risiko, das mit einem bestimmten technischen Vorgang oder Zustand verbunden ist und zusammenfassend durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben wird, die zu erwartende Häufigkeit des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses und das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß.“ (Kramer 2009, Abschnitt 1.1).

<sup>15</sup>Eine Vorhersage der Unfallschwere wird bisher nur durch Airbagsteuergeräte vorgenommen. Diese lösen anhand von Beschleunigungsverläufen, allerdings erst während einer Kollision, die Airbags aus.

<sup>16</sup>Verletzungsrisikofunktionen geben nur eine Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Verletzungskategorie an.

on, bezogen auf das Fahrzeug, angegeben beispielsweise als  $\Delta v$  oder EES<sup>17</sup>.  
**Biomechanik:** Die Belastung der einzelnen Körperregionen in einem spezifischen Fall, angegeben beispielsweise als Krafteinwirkung (z.B. Viscous Criterion), Beschleunigung oder Impuls (z.B. Spinal Acceleration Criterion)<sup>18</sup>.  
**Medizin:** Die resultierenden Einzelverletzungen, in der Regel nach Letalität oder Langzeitfolgen einzeln bewertet, beispielsweise angegeben als AIS<sup>19</sup>, die im Fokus der Traumaforschung stehen, müssen unterschieden werden von den Verletzungsmustern eines Verunfallten, der als Patient akut behandelt wird.<sup>20</sup>

Zwischen den drei Aspekten besteht eine Korrelation. Allerdings zeigt sich, dass im Einzelfall keineswegs von einer eindeutigen Kausalität ausgegangen werden kann. Daher gibt es auch keine direkten Funktionen zur Umrechnung, sondern nur auf Statistik basierende Verletzungsfunktionen. Deutlich wird dies in Fällen technisch hoher Unfallschwere mit geringer resultierender medizinischer Unfallschwere (bzw. umgekehrt). Auch im Hinblick auf das Bewertungskriterium medizinischer Langzeitfolgen bzw. Einschränkungen muss genauer differenziert werden. Technisch hohe Unfallschweren mit evtl. resultierenden schwerwiegenden medizinischen Unfallfolgen in Bezug auf eine Letalität können, wenn man sie überlebt, ohne Langzeitfolgen bleiben.<sup>21</sup> Umgekehrt kann es aber schon bei geringen technischen Unfallschwe-

---

<sup>17</sup> „EES (Energy-Equivalent Speed), [...] Geschwindigkeitsangabe [...], die stellvertretend für die am Fahrzeug verrichtete Verformungsarbeit [...] steht“ (Burg & Zeidler 1980).

<sup>18</sup> Viano & Lau (1985) beschreiben das Verletzungsrisiko des Thorax durch das multiplikative Produkt der Deformationstiefe und der Geschwindigkeit mit der diese Kompression erfolgt als Viscous Response. Das maximale Produkt wird als Viscous Criterion (VC) bezeichnet. Die Bezeichnung ist an der Stelle falsch gewählt, da das VC für die (nicht hohlen) visceralen Organe (Leber, Milz, Bauchspeicheldrüse, Niere etc.) steht. Das Spinal Acceleration Criterion gibt das Verletzungsrisiko über die maximale auftretende Beschleunigung an der Wirbelsäule (gemessen an bestimmten Punkten) an. Vergleiche Viano et al. (1989a) und Viano et al. (1989b) insbesondere zur Modellbildung und Ableitung von Risikofunktionen für Seitenkollisionen. Cavanaugh (2002) gibt eine umfassende Übersicht zu den verschiedenen Kriterien und der aktuellen Entwicklung. Derzeit wird das Compression Criterion (maximale Deformationstiefe des Thorax) häufig verwendet, da es eine gute Korrelation zur AIS besitzt.

<sup>19</sup> Abbreviated Injury Scale (AIS) Maßzahl der Verletzungsschwere.

<sup>20</sup> Vergleiche Ringdal et al. (2013).

<sup>21</sup> Beispielsweise Pneumo-Thorax oder eine Dreschflügel-Brust (Flail Chest).



ren zu Gelenkverletzungen kommen, die mit erheblichen Langzeitfolgen einhergehen.<sup>22</sup>

Wenn im Folgenden verallgemeinernd von Unfallschwere gesprochen wird, ist dies zwar als Summe aller Auswirkungen zu verstehen, eine Optimierung der Unfallschwere meint aber immer eine Anpassung (in der Regel eine Verringerung) der technischen Unfallschwere, mit dem Ziel die Letalität zu minimieren. An Stellen, die einer genaueren Differenzierung bedürfen, wird entsprechend exakt formuliert. Die Verallgemeinerung beinhaltet neben den Auswirkungen auf die am Unfall beteiligten Personen auch Sachschäden. Die als Verletzungsschwere bezeichneten Auswirkungen auf die beteiligten Personen können entweder als einzelne Verletzung pro verletzte Körperregion oder als maximale Verletzung bzw. Gesamtverletzung für eine oder alle am Unfall beteiligten Personen angegeben werden.

## 2.1 Angabe der Verletzungsschwere

Die Abbreviated Injury Scale (AIS) wird in der Automobilindustrie seit vielen Jahren<sup>23</sup> erfolgreich als Maßzahl der Verletzungsschwere verwendet (Levine 2002).

1969 von States vorgeschlagen, dient sie als vereinheitlichte Bewertung der Letalität einer einzelnen Verletzung.<sup>24</sup> Die Definition, welche Verletzung wie eingeordnet wird, erfolgt fortlaufend anhand von Expertenwissen durch die Association for the Advancement of Automotive Medicine.<sup>25</sup> Die Angabe<sup>26</sup>

---

<sup>22</sup>Beispielsweise Verletzungen des Sprunggelenks.

<sup>23</sup>Vergleiche States (1969), Baker & O'Neil (1976) und Petrucelli et al. (1981).

<sup>24</sup>Vergleiche Niebuhr et al. (2013) bzw. den von Mirko Junge betreuten Artikel in der deutschen Wikipedia zur AIS. Dort wird jeweils die Entwicklung der AIS bis heute beschreiben. Dabei werden die Ansätze verglichen und in den Verfahren inhärente Probleme diskutiert und gegenübergestellt.

<sup>25</sup>Vergleiche auch <http://www.AAAM.org/>, Stand Oktober 2013.

<sup>26</sup>Die Bewertung der Verletzungen wird häufig von den behandelnden Ärzten vorgenommen. Ringdal et al. (2013) untersuchen die Genauigkeit dieser Bewertung und kommen zu dem Ergebnis, dass diese Methodik zu fehlerhaften Bewertungen der Patienten führt. Eine geeignete Alternative wird in der GIDAS verwendet, bei der anhand einer festen Liste jeder traumatischen Diagnose eine oder mehrere AIS Bewertungen zugeordnet werden.

erfolgt auf einer Skala von 0 bis 6<sup>27</sup>, wobei 0 keine Verletzung und 6 eine maximale, derzeit nicht behandelbare, Verletzung bedeutet.

Zur vereinfachten Angabe wird häufig nur der Wert der höchsten AIS Verletzung einer Person angegeben und als MAIS bezeichnet.<sup>28</sup> Die MAIS Aggregation ist insofern problematisch, da sie nur die Überlebarkeit einer Verletzung berücksichtigt. Insbesondere eine Einteilung von Verletzungen in die Stufen „leicht“ und „schwer“ erscheint vor diesem Hintergrund problematisch (Niederer et al. 2001).<sup>29</sup>

Um Patienten mit mehreren verletzten Körperregionen besser beurteilen zu können, führen Baker et al. (1974) die ISS Skala ein. Der ISS-Wert wird durch die Summe der quadrierten MAIS<sup>30</sup> Werte der drei am schwersten verletzten Körperregionen gebildet. Das Ergebnis ist daher ein Wert zwischen 0 und 75, wobei 0 keine Verletzung und Werte  $\geq 16$  eine sehr schwere Verletzung (Polytrauma<sup>31</sup>) bedeuten. Diese Addition führt zu einer ordinalen Skalierung der Werte und damit zu einem Problem, wenn man versucht diese Werte und insbesondere deren Verteilungen miteinander zu vergleichen. Da der Unterschied zwischen zwei Werten nicht als absoluter vergleichbarer Faktor bestimmt wird, kann folglich nicht differenziert werden, wie stark sich die Verletzungsschwere zwischen den einzelnen ISS-Werten verändert.

Niebuhr et al. (2013) nutzen eine exponentielle Skalentransformation (ISSx), deren Werte besser mit der, anhand der in GIDAS bestimmten, Letalität der Unfälle korrelieren. Die als ISSx bezeichnete rationale Skalierung

---

<sup>27</sup>Nicht genau diagnostizierte Verletzungen werden als 9 kodiert und damit häufig für die Aggregation, aus der betrachteten Menge ausgeschlossen (Niebuhr et al. 2015).

<sup>28</sup>In weiterer Vereinfachung kann dieser auch den größten AIS Wert für die Insassen eines Fahrzeugs oder sogar aller am Unfall Beteiligten ausdrücken. Wenn nicht weiter angegeben, bezeichnet der MAIS Wert in dieser Arbeit immer die höchste AIS Verletzung einer Person.

<sup>29</sup>Historisch bedingt waren die ersten Ansätze der Unfallforschung darauf fokussiert die Letalitätsrate der Verkehrsunfälle zu senken. Mit dieser wurde auch eine implizierte Reduktion der schweren Unfälle erwartet. Durch die Reduktion auf den Maßstab reiner Überlebarkeit ergibt sich heute ein Problem bei der Beurteilung von Unfallverletzungen hinsichtlich der zu erwartenden Langzeitfolgen. Diese können, wie Croft & Freeman (2005) zeigen, schon bei niedrigen Geschwindigkeiten auftreten und können auch aus sehr gut zu überlebenden Verletzungen resultieren. Vergleiche beispielsweise Schubert (2010, Kapitel 6) zum Thema der Fußverletzungen.

<sup>30</sup>Für AIS Werte zwischen 0 und 5. Eine AIS 6 Verletzung wird direkt mit 75 bewertet.

<sup>31</sup>Im Englischen „multiple injured“. Vergleiche Copes et al. (1988).

erlaubt die mathematisch korrekte Differenzbildung der Werte. Aus der Differenz zweier ISSx-Werte kann daher auch eine Aussage über den Unterschied der zugrundeliegenden technischen Verletzungsschwere der beiden Unfälle getroffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei vergleichenden Betrachtungen versucht, die Verletzungsschwere basierend auf ISSx anzugeben, sofern die Daten entsprechend kodiert vorliegen.

Für diese Arbeit wird davon ausgegangen, dass alle Verletzungen, deren AIS-Wert<sup>32</sup>  $\leq 1$  bzw. ISSx-Wert  $\leq 0,25$  ist, als leichte Verletzungen zu werten sind. Alle Verletzungen, deren AIS-Wert  $\geq 2$  (auch als 2+ geschrieben) bzw. ISSx-Wert  $> 1,0$  ist, werden als schwere Verletzungen gewertet, ISSx-Werte  $\geq 2,5$  entsprechen etwa AIS-Wert 3+. Gesamtverletzungen mit einem ISS-Wert  $\geq 16$  (auch als 16+ geschrieben) bzw. ISSx-Wert  $\geq 5,0$  werden als Polytrauma bezeichnet. Zu beachten ist, dass sich diese Einordnung nur auf die Letalität und nicht auf die möglichen Langzeitfolgen einer Verletzung bezieht. Auf dem Weg zu verletzungsfreiem Fahren ist dabei der erste Schritt eine Reduktion aller Verletzungen auf AIS-Werte  $\leq 1$  bzw. die Reduktion von mit Langzeitfolgen verbundenen AIS-1 Verletzungen.

## 2.2 Entwicklung der integralen Sicherheit

Die Geschichte der Fahrzeugsicherheit begann im Wesentlichen erst in den 1950er Jahren. Obwohl in Deutschland bereits 1908 die Haftpflicht für den Betrieb von Kraftfahrzeugen eingeführt wurde<sup>33</sup>, gab es keine gesetzlichen Vorschriften für den Fahrzeugbau. Den Herstellern wurde „ein gewisses Maß an persönlicher Freiheit und konstruktiver Verantwortung“ überlassen. Erst

---

<sup>32</sup>In zwei ISS Körperregionen.

<sup>33</sup>Das heutige 'Gesetz über die Pflichtversicherung für Kraftfahrzeughalter' geht in seinem Ursprung über das 'Gesetz über die Einführung der Pflichtversicherung für Kraftfahrzeughalter und zur Änderung des Gesetzes über den Verkehr mit Kraftfahrzeugen sowie des Gesetzes über den Versicherungsvertrag' vom 7. November 1939 (RGBl. I S. 2223) auf das im Deutschen Reich eingeführte 'Gesetz über die Haftung für Schäden aus dem Betriebe von Kraftfahrzeugen' vom 9. August 1908 (RGBl 162/1908) zurück. In dessen Folge wurde die Einführung von Haftungsansprüchen gegen den Betreiber von Kraftfahrzeugen mit der am 1. November 1908 eingeführten 'Verordnung des Ministers des Innern im Einvernehmen mit dem Justizminister, betreffend die Haftpflichtversicherung für Schäden aus dem Betriebe von Kraftfahrzeugen' (RGBl 222/1908) vorgeschrieben.

durch die jahrelange Arbeit von DeHaven entwickelt sich ein Umdenken, dass Verunfallte in Fahrzeugkollisionen von Glück und Pech betroffen sind zu einem kausalen Zusammenhang zwischen konstruktiven Mängeln und resultierenden Verletzungen. (Haddon, Jr. et al. 1964, Kapitel 9)

Durch die steigende Anzahl der Fahrzeuge und die zunehmende Fahrleistung bekam das Problem der Verkehrssicherheit einen gesellschaftlichen Aspekt. Insbesondere durch die resultierenden Kosten für das Gemeinwesen und steigenden politischen Druck unterzeichnete der amerikanische Präsident Johnson 1966 den 'National Traffic and Motor Vehicle Safety Act'<sup>34</sup>. Schon vorher formulierte Nader (1965) die grundlegenden Probleme der Fahrzeugsicherheit. Er beschreibt ausführlich die Ursache der Verletzungen, die er „second collision“ nennt. Dabei handelt es sich um das Zusammenstoßen der Insassen mit Objekten im Innenraum als Folge einer vorherigen Fahrzeugkollision. Zur Reduktion der Auswirkungen fordert er die Einführung von „passiven Rückhaltesystemen“, die ohne Mitwirkung der Insassen diese schützen. In seiner Analyse verwendet er die Berichte der „Automotive Crash Injury Research“ (ACIR). Diese wurden am „Aviation Safety and Research Facility“ Institut der Cornell Universität unter Leitung von DeHaven erstellt und gehören zu den ersten systematischen Erhebungen, Auswertungen und Analysen von Fahrzeugunfällen.<sup>35</sup> Heute geht man davon aus, dass der Weiterentwicklung der passiven Maßnahmen zukünftig eine geringere Rolle bei der Steigerung der Verkehrssicherheit zukommt.<sup>36</sup>

---

<sup>34</sup>Es folgten weltweit vergleichbare Vorschriften zur Fahrzeugsicherheit. Beispielsweise in Frankreich durch die Gesetze im Code de la Route (Erstveröffentlichung 1969), in England durch die Motor Vehicle Regulations (Erstveröffentlichung 1966), die kanadischen Safety Standards, australischen Design Rules (Erstveröffentlichung 1969) sowie die japanischen Gesetze (Erstveröffentlichung 1969) (Seiffert 1974).

<sup>35</sup>Ein Lebenslauf, der die Entstehung dieses Forschungsgebiets detailliert beschreibt, findet sich in Mary (1983). Vergleiche auch MacLennan (1988) und Haddon, Jr. et al. (1964).

<sup>36</sup>Die verbreitete Annahme, dass es zu einer kompletten Verschiebung kommt, bei der die passive Sicherheit sukzessive von aktiven Maßnahmen abgelöst wird, erscheint aber für die nahe Zukunft zumindest fraglich. Ein Grund ist, dass sich die Sicherheitsbewertung nach ISO-Norm 26262 im Versagensfall eines aktiven Systems auf die Bewertung der vorhandenen passiven Sicherheit bezieht. Ein weiterer Grund ist, dass aktive Systeme zurzeit nur einzelne Gefahrsituationen adressieren und dafür größtenteils von den stark strukturierten Verkehrsdomänen in Nordeuropa oder Nordamerika ausgehen.

Aktive Systeme, die zum Ziel haben Unfälle zu vermeiden, kamen mit der gesetzlichen Vorschrift für eine 3. Bremsleuchte (CHMSL) in den 1980er Jahren bzw. mit der Einführung von Anti-Blockier Systemen (ABS) in den 1990er Jahren flächendeckend zum Einsatz. Ziel dieser Systeme ist die Warnung des Umfeldes bzw. die Verbesserung der Beherrschbarkeit und Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs zur Vermeidung von Unfällen. Analog zur historischen Entwicklung der passiven Sicherheit hat der Gesetzgeber mittlerweile auch in diesem Bereich in vielen Ländern eine Vielzahl an Funktionen vorgeschrieben. Neuere Systeme verbinden dafür die immer leistungsfähigere maschinelle Wahrnehmung, um passive Schutzmaßnahmen vor einer Kollision auszulösen. Durch die Kombination beider Bereiche soll die Sicherheit zusätzlich erhöht werden. Die schnell wachsende Zahl dieser Systeme macht deutlich, dass die Zukunft der Verkehrssicherheit nicht nur in den Verbesserungen der aktiven oder passiven Systeme liegt, sondern auch in steigendem Maße im gegenseitigen Zusammenspiel – als integrale Sicherheit bezeichnet – der beiden Bereiche (Heudorfer & Meißner 2008).

### 2.2.1 Entwicklung der passiven Sicherheit

Die Entwicklung von Rückhaltesystemen<sup>37</sup> gehörte mit zu den ersten Maßnahmen der passiven Sicherheit. Diese haben zum Ziel die Insassen im Falle einer Kollision auf dem Sitz zu fixieren, um somit einen Zusammenstoß mit den Strukturen des Fahrzeugs und ein Herausschleudern zu verhindern. Insassenrückhaltesysteme bestanden zunächst aus zwei Komponenten – dem Sitz und dem Sicherheitsgurt zum Anschnallen – die sukzessive weiterentwickelt werden.

Bei den **Sicherheitsgurten** erfolgte zunächst die Einführung von 2-Punkt Gurten analog zum Flugzeug. Aufgrund des dadurch auftretenden

---

<sup>37</sup>Die Tabelle A.1 im Anhang enthält eine Auflistung der grundlegenden Erfindung (im Text fett gedruckt) mit weiterführenden Informationen. Angegeben sind das erste Patent bzw. die erste Veröffentlichung, die erste Markteinführung (weltweit) sowie die erste Serieneinführung in Deutschland. Eine Zusammenfassung der gesetzlichen Vorschriften in verschiedenen Ländern findet sich in Kramer (2009, Abschnitt 6.2.3). Eine Auflistung der gesetzlichen Anforderungen in Deutschland (inkl. der UN/ECE Verordnungen) findet sich in Seiffert et al. (2011, Abschnitt 2.2.2).

„Klappmesser-Effekts“, bei dem die Insassen am Becken zwar durch 2-Punkt Gurte am Sitz gehalten, dafür aber mit dem Kopf auf Lenkrad oder Instrumententräger aufprallten, wurden diese zu **3-Punkt Gurten** erweitert (siehe Abbildung 2.2). Erst durch die gesetzliche Gurtragepflicht<sup>38</sup> fanden diese Systeme eine breite Verwendung. Mit der Erweiterung von Automatikgurten durch **Gurtstraffer** (verbessert die Ankopplung des Insassen an das Fahrzeug durch Reduktion der Gurtlose) und **Gurtkraftbegrenzer** (Verminderung der Eigenverletzungen bei schweren Unfällen am steifen Gurt durch Nachgeben/Abrollen der Gurte) in den 1980er Jahren erfuhren diese Systeme eine weitere Verbesserung.<sup>39</sup> Heutige motorisierte bzw. **elektrische Gurtstraffer** und **motorisierte Gurtschlösser** können reversibel ausgelöst werden. Sie erlauben damit eine verbesserte Anbindung der Insassen schon zum Zeitpunkt der Pre-Crash Phase.<sup>40</sup> **Aufblasbare Gurte** zur besseren Verteilung der wirkenden Kräfte auf die Schulter und den oberen Thorax-Bereich erscheinen insbesondere für die Fondpassagiere sinnvoll.<sup>41</sup> Schwierig ist weiterhin die optimale Auslegung der maximal wirkenden Kräfte, um jüngere Insassen optimal zu schützen, ohne ältere Insassen zu gefährden.<sup>42</sup>

Mit der Einführung von Gurtsystemen mussten auch die Sitzkonstruktionen verbessert werden. Dafür wurden die Sitzlehnen verlängert und für größere Belastungen ausgelegt. Zur Verminderung von Schleudertraumata wurden **Kopfstützen** als Verlängerung der Sitzlehne verpflichtend auf den Vordersitzen vorgeschrieben (Severy et al. 1968). Für die Rückbank ist bisher keine gesetzliche Vorschrift erfolgt. **Aktive Kopfstützen**, die im Falle einer Koll-

---

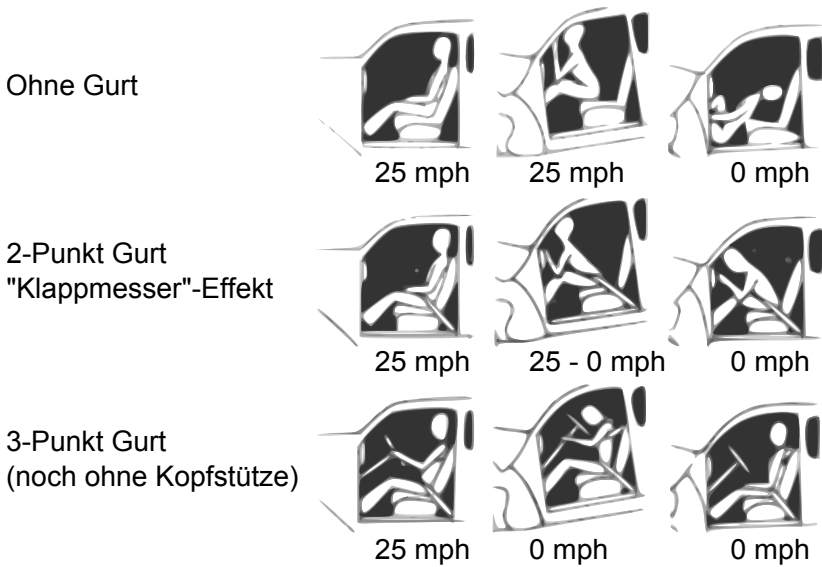
<sup>38</sup>Das erste Land mit gesetzlicher Gurtpflicht war Australien ab 1964.

<sup>39</sup>Vergleiche Mertz & Dalmotas (2007).

<sup>40</sup>Die Pre-Crash Phase bezeichnet den Zeitabschnitt einer Gefahrensituation, für den eine Kriticalitätsgrenze überschritten ist und eine Kollision wahrscheinlich, aber nicht zwingend, folgt. Über die Umfeldwahrnehmung und Situationsinterpretation von Fahrerassistenzsystemen können zu diesem Zeitpunkt reversible unfallfolgenmindernde Maßnahmen aktiviert werden. Nicht reversible Maßnahmen, beispielsweise die Auslösung von Außenairbags, die vor einer Kollision aktiviert werden müssen, benötigen zusätzlich eine Situationsinterpretation, die in der Pre-Crash Phase erkennt, wann eine Kollision unvermeidbar geworden ist.

<sup>41</sup>Obwohl Kent & Patrie (2004) mittels theoretischer Evaluierungen einen positiven Effekt in Frage stellen, konnte dieser im Schlittenversuch und per Simulation für unterschiedliche Systeme mittlerweile nachgewiesen werden (Forman et al. 2010; Kent et al. 2011; Sundararajan et al. 2011). Die Untersuchung der Feldeffektivität steht noch aus.

<sup>42</sup>Vergleiche Mertz & Dalmotas (2007).



**Abbildung 2.2:** Vergleich der verschiedenen Sitzgurtkonfigurationen (Severy & Mathewson 1956)

sion diese näher an den Kopf der Insassen führen, oder Systeme, die manuell in zwei Richtungen verstellbar sind, reduzieren die Risiken weiter.

Parallel wurden zahlreiche Maßnahmen im Innenraum zur Erhöhung der Sicherheit der Insassen bei einem Zusammenstoß entwickelt. Die vorher starr ausgeführten Konstruktionen wurden durch **Sicherheitslenksäulen** ersetzt, die bei Aufprall des Fahrers nachgeben können. Dabei werden Lenkstock- bzw. Lenksäulenkonstruktionen eingesetzt, die sich teleskopartig zusammenschieben oder an definierten Stellen brechen. Das Lenkrad selbst wurde an-

fänglich zusätzlich gepolstert und 1973 erstmals mit einem **Airbag**<sup>43</sup> ausgestattet.

Zum Schutz der Beifahrer war ein **Beifahrerairbag** bereits Bestandteil dieses ersten Systems. Eine weitere Entwicklung wurde durch die Einführung von zweistufigen Airbagsystemen erreicht.<sup>44</sup> Seitdem fanden weitere Fortschritte durch die Einführung von **Seiten-, Rücksitz-, Kopf-** (Curtain) und **Kniesairbags** statt.<sup>45</sup> Sogenannte **Außenairbags** außerhalb des Fahrzeugs gehören in diesem Sinne nicht zu den Rückhaltesystemen. Sie dienen entweder dem Schutz von Fußgängern oder Radfahrern oder dienen als zusätzliche Knautschzone bzw. Bremshilfe.

Außerhalb der Zonen, die durch Airbags geschützt sind, wurden Innenräume ab Anfang der 1960er Jahre so ausgelegt, dass Verletzungen durch Aufprall der Insassen minimiert wurden. Anfänglich wurde dies durch Reduktion scharfkantiger und besonders fester Materialien erreicht. Kiefer et al. (1976) schlagen daher als maximale Lösung vor den gesamten Innenraum großflächig mit einer nachgebenden energieverzehrenden Unterstruktur zu polstern.

Um die Insassen vor Verletzungen durch Deformation der Innenräume und eindringende Teile zu schützen, wurde das Konzept der **Fahrgastzelle** entwickelt. Diese ist steifer und aus festeren Materialien konstruiert, um bei Kollisionen ihre ursprüngliche Form zu behalten. Vorausgegangen waren beispielsweise ab 1940 Verbesserungen zu unfallsicheren Bodengruppen durch Bèla Barènyi. Anfänglich waren insbesondere die Bestrebungen zum Erhalt eines Überlebensraums beim Überrollen maßgeblich.<sup>46</sup> Barènyi entwickel-

---

<sup>43</sup>In der Literatur finden sich auch Quellen, die die Feldeffektivität von Airbags in Frage stellen. Beispielsweise können McGwin, Jr. et al. (2003a) für Frontairbags auf den vorderen Sitzen keinen Nutzen hinsichtlich des Verletzungsrisikos, mit oder ohne gleichzeitiger Benutzung von Sitzgurten, nachweisen.

<sup>44</sup>MacLennan et al. (2008) können für diese Systeme keine allgemeine Verbesserung feststellen. Es kommt aber zu einer Verschiebung der Verletzungsarten. Vergleiche auch McGwin, Jr. et al. (2003a) die bereits für einstufige Airbags keinen Nutzen nachweisen können.

<sup>45</sup>Vergleiche auch McGwin, Jr. et al. (2003b), Kent et al. (2005) und Griffin et al. (2012) für eine Übersicht zu den jeweiligen Feldeffektivitäten.

<sup>46</sup>Die Auswirkung der Deformation des Daches auf die Verletzungswahrscheinlichkeit (Hals- und Wirbelsäulenverletzungen) wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Bahling et al. (1990) sehen die Gefahren beim Roll-Over im Kontakt der Insassen mit dem Dach. Demnach ist die Bewegung der Insassen und der erste Kontakt (noch bevor das Dach kollabiert) maßgeblich für die Verletzungswahrscheinlichkeit. Brumbelow et al. (2008) finden in Unfalldaten



te daraus das Konzept der Fahrgastzelle mit energieverzehrenden Strukturen (**Knautschzone**) im Vorder- und Hinterwagen. Seitlich wurde durch Einführung des Flanken- bzw. **Seitenaufprallschutzes** die Zellenstruktur versteift. In der Konstruktion heutiger Fahrgastzellen kommen immer mehr hochfeste und höchstfeste Stähle zum Einsatz, um die Steifigkeit zu erhöhen und das Gewicht zu reduzieren.<sup>47</sup>

Im Rennsport wird deutlich, welches Potenzial durch gezielte Optimierung möglich ist. Monocoque, Schalensitze mit HANS System und 6-Punkt Gurt ermöglichten es Ralf Schumacher 2004 eine ungebremste Frontalkollision mit einer Stahlbetonmauer bei Tempo 280 km/h ohne bleibende Verletzungen zu überleben (Hecker 2004). Durch die hohen ergonomischen Einschränkungen und die stark eingeschränkte Sicht lassen sich diese speziellen Konzepte allerdings nicht ohne weiteres auf normale Straßenfahrzeuge übertragen.

### 2.2.2 Entwicklung der aktiven Sicherheit

Die ersten Verbesserungen der aktiven Sicherheit wurden durch verbesserte Bremssysteme, insbesondere mit der Einführung von **Bremskraftverstärkern** und der **3. Bremsleuchte** erreicht. Die weiterentwickelten Bremsassistenten **BAS** enthalten heute eine Vielzahl an Funktionen, um die Bremsanforderung des Fahrers zu optimieren. So wird beispielsweise bei sehr schneller Rücknahme des Drucks vom Fahrpedal schon ein Pre-Fill der Bremse ausgelöst, um die Ansprechzeit der Bremse zu verbessern. Analog zum Sitzgurt wurde auch das **elektromechanische ABS** vom Flugzeug übernommen<sup>48</sup>, zunächst nur auf die Hinterräder wirkend. Um ein Ausbrechen der Hinterachse zu verhindern, wurden bald leichtere und günstiger herzustellende **elektronische ABS**, die über die Bremsanlage auf alle vier Räder wirken, entwickelt. Ziel ist es ein Blockieren der Räder zu verhindern, um jederzeit eine Reak-

---

ein reduziertes Verletzungsrisiko für Fahrzeuge mit stärkerer Dachstruktur, berücksichtigen die Bewegung der Insassen aber nicht. Aktuell untersucht das NHTSA-Projekt: „Motorcoach Rollover Structural Integrity“ genauer welchen Einfluss die Insassenbewegung und die Deformation auf die Verletzungen haben.

<sup>47</sup>Eichhorn et al. (2009) und Seidenstücker (2013) beschreiben die sicherheits- und unfallrelevanten Details am Beispiel der Polo-V bzw. der Golf-VII Fahrzeugkarosserie.

<sup>48</sup>Vergleiche Smith (1953), Johnson (2000) und Johnson (2009).

tion des Fahrzeugs auf die Lenkbewegung des Fahrers zu erlauben und den Anhalteweg zu verkürzen. Als Weiterentwicklung von **Traktionskontrollsystemen** wurden Systeme zur elektronischen Stabilisierung (**ESC**) des Fahrzeugs durch gezielte Bremseingriffe ergänzt. Dazu werden mittels erweiterter Sensorik (u.a. Lenkwinkel, Radumdrehungen, Schwimmwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Querschleunigung) das Fahrzeugverhalten mit den Vorgaben des Fahrers am Lenkrad abgeglichen. Anhand dieser Daten werden einzelne Räder gezielt abgebremst, um ein Schleudern oder Überschlagen des Fahrzeugs zu verhindern und das Fahrzeug zu stabilisieren (van Zanten & Kost 2012). Im Gegensatz zu ABS Systemen, die vom Fahrer nicht als solche, sondern als „Rütteln“ auf dem Bremspedal wahrgenommen werden, ist ein ESC Eingriff für Laien nur durch Anzeigeelemente im Kombi-Instrument zu bemerken.<sup>49</sup> Heutige Systeme kombinieren die Bremseingriffe mit einer Anpassung der Servolenkung, um eine zusätzliche Lenkunterstützung zu erreichen. Darüber hinaus führen sie nach einer Kollision mit Airbagauslösung eine Vollbremsung (**Post Impact Control**) aus, um das Risiko einer zweiten Kollision zu minimieren, und lösen einen Notruf über das Mobilfunknetz aus (**eCall**).

Durch die Einführung von Sensorik, die zusätzliche Informationen aus dem Umfeld maschinell wahrnimmt, wurden erweiterte Assistenzsysteme möglich, die im Einzelfall einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit darstellen können. Anfänglich wurden Informationen aus dem straßenbaulichen Umfeld detektiert. Anhand der videobasierten Erkennung von Fahrbahnmarkierungen wurden Assistenzsysteme zur **Spurverlassenwarnung** eingeführt. Diese wurden von **Spurhalteassistenten** abgelöst, die durch Lenk- bzw. einseitige Bremseneingriffe das Fahrzeug für kurze Zeiträume am Verlassen des eigenen Fahrstreifens hindern. Kombiniert mit der Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer auf Nachbarfahrstreifen warnen **Spurwechselassistenten** oder führen einen aktiven Eingriff zur Kollisionsvermeidung aus. Neben der Fahrspur werden durch **Verkehrszeichenerkennung** Informationen im Umfeld wahrgenommen und dem Fahrer zur Unterstützung dargestellt.

---

<sup>49</sup> „Verunfallte geben teilweise zu Protokoll, dass sprichwörtlich die „Hand Gottes“ das Fahrzeug vor der Kollision wieder gerade ausgerichtet hat.“ Persönliche Kommunikation mit Dr. Mirko Junge, Dezember 2013.

Aktive Tempomaten (**ACC**) sind eine Weiterentwicklung der Geschwindigkeitsregelanlagen. Sie erfassen mittels maschineller Wahrnehmung (z.B. Radar) vorausfahrende Fahrzeuge und passen die Geschwindigkeitsvorgabe an diese Fahrzeuge an. Die automatische Geschwindigkeitsanpassung vereinfacht die Fahraufgabe und entlastet den Fahrer bei der Fahrzeugführung. Durch die Möglichkeit zur Wahrnehmung von bewegten und unbewegten Objekten wurden darauf aufbauend sogenannte Pre-Crash Systeme als Notbremsysteme zur Unfallvermeidung (**Collision Avoidance**) und Unfallfolgenminderung (**Collision Mitigation**) entwickelt. Dabei wird über die eingesetzten Aktoren differenziert: Bremsung (by braking), Lenkung (by steering) oder Lenkung und Bremsung (by steering and braking). Die Verfahren unterscheiden sich herstellerepezifisch bezüglich der eingesetzten Sensoren und Handlungskonzepte.

Maurer (2012b) führt eine Kategorisierung ein, um die Vielzahl der unterschiedlichen Systeme genauer zu klassifizieren. Reschka et al. (2015) passen diese Klassifizierung an die ISO Normen ISO 15623<sup>50</sup> und ISO 22839<sup>51</sup> an. Dabei beschränken sich die Definitionen auf ausgerüstete Fahrzeuge, die frontal mit einem Verkehrsteilnehmer zusammenstoßen („forward vehicle collision“ – FVC). Die Obermenge der Frontalkollisionsassistenzsysteme wird als FVCX definiert. Die entsprechenden Ausprägungen werden als Frontalkollisionsvorbereitung (FVCC), -warnung (FVCW), -kollisionssschwereminderung (FVCM) und -kollisionsverhinderung (FVCA), entsprechend der englischen Begriffe conditioning, warning, mitigation und avoidance bezeichnet. (Reschka et al. 2015)

Reschka et al. (2015) lassen die Art des Unfalltyps und der Unfallgegner offen, da sie sich nur auf die Stoßrichtung des ausgerüsteten Fahrzeugs beziehen. Zugleich stellen sie den Schutz „der Fahrzeuginsassen“ in den Vordergrund, ohne zwischen technischer und medizinischer Unfallschwere zu differenzieren. Die vorgeschlagene Klassifizierung bedarf daher stets einer zusätzlichen Abgrenzung, wenn Aspekte wie spezielle Unfallgegner (z.B. Fußgänger), Partnerschutz (z.B. im Querverkehr) oder kooperative Eingriffe im Vordergrund des Systemnutzens stehen sollen. Das im Rahmen dieser

---

<sup>50</sup>Vergleiche ISO 15623 (2013).

<sup>51</sup>Vergleiche ISO 22839 (2011).

Arbeit vorgestellte Handlungskonzept adressiert Frontalkollisionen (mit querendem Verkehr) und ist damit eine Spezialisierung der FVCX-Funktionen von Reschka et al. (2015), das Aspekte der Vorbereitung, Warnung und Unfallfolgenminderung enthält. Ein Unterschied zur FVCX-Definition ist, dass der Schwerpunkt des Systems die Reduktion der medizinischen Unfallschwere aller am Unfall Beteiligten darstellt und nicht nur der Fahrzeuginsassen des stoßenden Fahrzeugs.

Funktionen die zeitlich nach einer ersten Kollision (Post-Crash) aktiv sind, um beispielsweise die Kontrollierbarkeit zu erhöhen oder Unfallfolgen von weiteren Kollisionen zu mindern, werden von Reschka et al. (2015) nicht angesprochen und entsprechend eingeordnet. Diese Phase ist allerdings auch nicht unmittelbar abhängig von einer Frontalkollision. Entsprechende Funktionen können damit auch nach anderen Kollisionstypen ausgeführt werden. Maurer (2012b) und Reschka et al. (2015) beschreiben nicht explizit den Endpunkt einer Funktionsausführung, daher könnten diese Aspekte auch in den FVCX-Funktionen enthalten sein. Dennoch ergibt sich für FVCM- und FVCA-Funktionen möglicherweise ein Bedarf diese Aspekte detailliert zu betrachten und entsprechend abzugrenzen.<sup>52</sup> Für diesen Fall könnte die Liste um FVCP (für Post-Crash Safety) erweitert werden.

Dabei finden sich die grundlegenden Konzepte einer Eskalationskaskade von Warnung über Teileingriffe bis hin zu einem automatischen Vollbremsseingriff inzwischen bei allen Herstellern wieder. Im Folgenden soll daher detaillierter vorgestellt werden, wie ein generisches Handlungskonzept für die Unfallfolgenminderung im Längsverkehr heute aussieht. In Kapitel 4 wird dieses Konzept analog für den Querverkehr entwickelt.

### 2.2.3 Handlungskonzepte der unfallfolgenmindernden Systeme im Längsverkehr

Der folgende Abschnitt beschreibt das universelle Handlungskonzept und den typischen Eingriffsablauf eines Systems zur Unfallfolgenminderung bei einer Gefahrensituation im Längsverkehr.<sup>53</sup> Eine zeitliche Einordnung erfolgt über

---

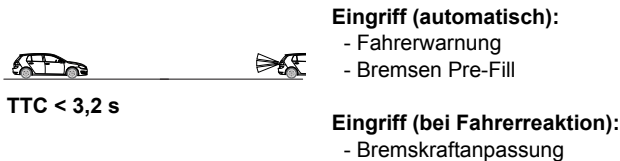
<sup>52</sup>Vergleiche bspw. Heck & Junge (2014a;b).

<sup>53</sup>Eine herstellerabhängige Beschreibung dieser Konzepte findet sich für Mercedes-Benz „Pre-Safe“ in Schöneburg (2010), Audi „Pre Sense“ in Pankalla et al. (2010), Volkswagen „Pro-

die Time to Collision (TTC), die den zeitlichen Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen, bei aktueller Geschwindigkeit beschreibt.

Zunächst werden die Eskalationsstufen im zeitlichen Ablauf erläutert. Beim Ausbleiben einer Reaktion des Fahrers, um den Verkehrskonflikt zu entschärfen, werden die Stufen sukzessive durchlaufen. Reagiert der Fahrer, wird unterschieden zwischen einem Bremsmanöver und einem Ausweichversuch in Form eines Lenk- bzw. Beschleunigungsmanövers (über eine deutliche Druckerhöhung auf dem Fahrpedal). Bremsen wird vom System verstärkt, um den Fahrer bestmöglich zu unterstützen das Fahrzeug anzuhalten bzw. zu verlangsamen. Lenken und Beschleunigen werden als Abbruchkriterien der automatischen Längsführung gewertet, führen zu einer Freigabe der Bremse und damit zur Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer. Exemplarisch wird im Folgenden jede Stufe einzeln vorgestellt:

### 1. Stufe – Warnung



**Abbildung 2.3:** 1. Stufe eines Handlungskonzepts zum Notbremsen im Längsverkehr

Bei der Annäherung an ein Objekt mit hoher Relativgeschwindigkeit wird situativ und bis zu 3,2 Sekunden vor der Kollision eine visuelle und auditive Warnung aktiviert. In dieser Phase kann auch ein Bremsruck oder ein leichter Gegendruck mittels haptischen Gaspedals erfolgen. Zugleich wird die Reaktionszeit der Bremse mittels Pre-Fill für ein erwartetes Bremsmanöver optimiert.<sup>54</sup> Bei einer durch den Fahrer initiierten Bremsung wird die Parametrie-

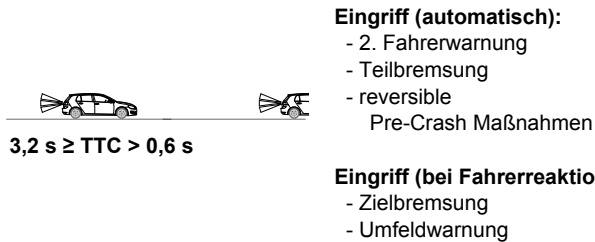
---

Aktives Insassenschutzsystem“ in Henning (2010) sowie allgemeinere Beschreibungen in Winner (2012) und Maurer (2012b).

<sup>54</sup>Durch das Anlegen der Bremsbeläge an die Bremsscheibe mit einem Druck von ca. 3 bar wird die Ansprechzeit der Bremse bei einem späteren automatischen Eingriff um ca. 50 ms verbessert.

rung des Bremsassistenten geändert und damit der Bremsdruck automatisch verstärkt, um eine Kollision zu vermeiden (Zielbremsung).

## 2. Stufe – Gefahrenwarnung

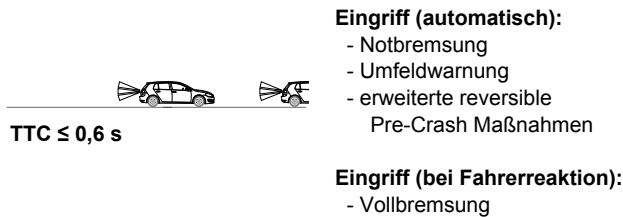


**Abbildung 2.4:** 2. Stufe eines Handlungskonzepts zum Notbremsen im Längsverkehr

Erfolgt keine Reaktion durch den Fahrer, wird eine zweite Warnung und eine Teilbremsung initiiert. Diese hat zum Ziel den Fahrer zusätzlich zum Bremsen aufzufordern, verlängert die Zeitdauer bis zur Kollision und reduziert die kinetische Energie in der Kollision. Weitere reversible Maßnahmen werden zeitgleich, je nach Verfügbarkeit, aktiviert. Dazu gehören reversible Gurtstraffer, das automatische Schließen der Fenster, eine Optimierung der Sitzposition und die Versteifung aktiver Federdämpfer im Fahrwerk. Im Falle einer Fahrerbremsung wird durch den BAS eine Zielbremsung ausgeführt.

## 3. Stufe – Notbremsung

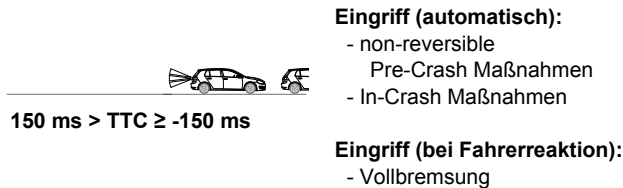
Bleibt eine Fahrerreaktion aus, wird ab etwa 0,6 Sekunden vor der Kollision eine Notbremsung eingeleitet. Diese ist in ihrer Stärke abhängig von der vorliegenden Verkehrssituation. Gleichzeitig wird eine Warnung des Umfelds über Brems- und Warnleuchten ausgelöst. Sind Sensoren zur Überwachung des rückwärtigen Fahrzeugbereichs vorhanden, wird die Verzögerung angepasst, um eine Auffahrkollision durch folgende Fahrzeuge zu verhindern. Fahrzeuge ohne entsprechende Sensoren begrenzen die Höhe der Verzögerung auf einen als unkritisch angesehenen Wert. Bei geringen Geschwindigkeiten (bis 20 km/h) reichen auch die, durch eine maximale Fahrzeugge-



**Abbildung 2.5:** 3. Stufe eines Handlungskonzepts zum Notbremsen im Längsverkehr

schwindigkeit bei Auslösung limitierten Funktionen aus, um eine Kollision zu vermeiden.<sup>55</sup>

### 4. Stufe – Crash



**Abbildung 2.6:** 4. Stufe eines Handlungskonzepts zum Notbremsen im Längsverkehr

Bei höheren Geschwindigkeiten gibt es erste Konzepte, um unmittelbar vor der Kollision die Verzögerung zusätzlich zu erhöhen und die Fahrzeugfront anzuheben. Daimler stellt im Forschungsfahrzeug ESF 2009 mit dem „Brakingbag“, eine Art Bremsairbag unter dem Fahrzeug, ein erstes System vor und kündigte es für die zukünftige Markteinführung an (Mellinghoff et al. 2010). Eine Erhöhung des Fußgängerschutzes erfolgt in diesem Zeitraum durch Maßnahmen wie etwa das Anheben von Motorhauben oder über einen

---

<sup>55</sup>Vergleiche beispielsweise Mende (2011).

externen Fußgängerairbag. Die aus der maschinellen Wahrnehmung prädi-  
zierte technische Unfallschwere kann zur gezielten Anpassung der Systeme  
der passiven Sicherheit genutzt werden, zum Beispiel durch Airbagsteifigkei-  
ten, Gurtspanner und Gurtkraftbegrenzer.

## 5. Stufe – Notbremsung



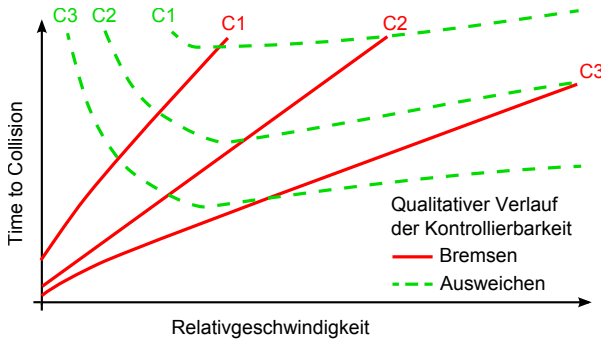
**Abbildung 2.7:** 5. Stufe eines Handlungskonzepts zum Notbremsen im Längsverkehr

Nach einer Kollision wird bis zum Erreichen einer Mindestgeschwindigkeit das Fahrzeug über die Bremsanlage verzögert (Multikollisionsbremse). Dies soll die Gefahr bzw. Aufprallgeschwindigkeit einer sekundären Kollision reduzieren. Zusätzlich werden Licht- und Blinkeranlage angeschaltet, um andere Fahrzeuge zu warnen. In Abhängigkeit einer prognostizierten Verletzungsschwere der Kollision kann ein automatischer Notruf (eCall) vom Fahrzeug abgegeben werden. Dieser wird für alle neu zugelassenen Fahrzeuge in der EU ab 2015 verpflichtend vorgeschrieben (RL 2010/40/EU).

Um Eingriffsschwellen zu definieren, die die ganze Bandbreite der Fahrerpopulation bestmöglich unterstützen und gleichzeitig bei sportlicher Fahrweise die Fehlauflösungen gering halten, kann man Probandenstudien zur Kontrollierbarkeit durchführen. Abbildung 2.8 zeigt den beispielhaften Verlauf der Kontrollierbarkeiten. Zur Definition einer zeitlichen Grenze für die Eingriffsschwelle der Teilbremsung, wie beispielsweise in Winner (2012), kann dann der Bereich zwischen C1 und C2 genommen werden. Höhere Stufen werden mit entsprechender sinkender Kontrollierbarkeit aktiviert. Eine Voll-



oder Notbremsung kann zu dem Zeitpunkt aktiviert werden, an dem eine Kollision unvermeidbar geworden ist.<sup>56</sup>



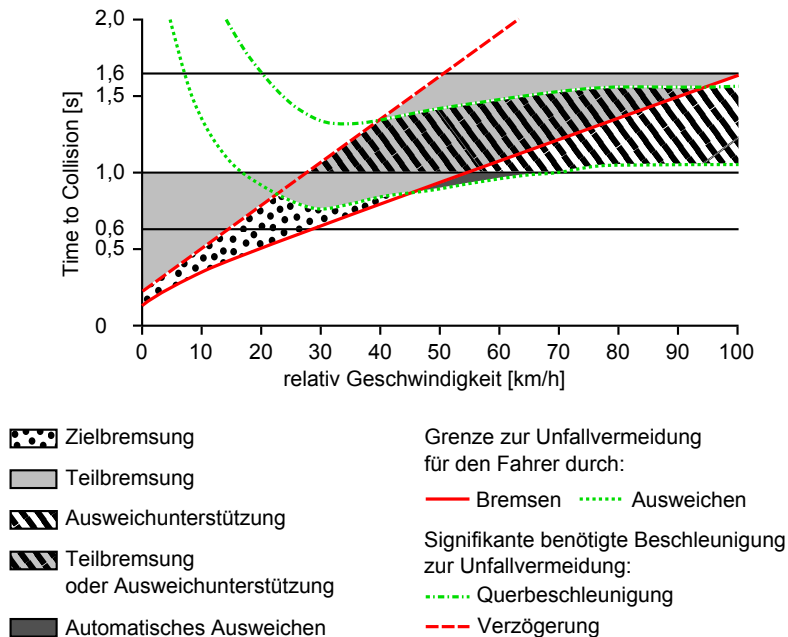
**Abbildung 2.8:** Prinzipieller Verlauf der ISO 26262 Kontrollierbarkeiten eines Notbremssystems für den Längsverkehr in Anlehnung an Brännström et al. (2011) und Winner (2012). C3: Nur durch professionelle Fahrer ausführbar; C2: 85 % der Fahrer beherrschen die Situation; C1: Wie C2 und 85 % bewerten die Aufgabe zusätzlich als einfach.

Abbildung 2.9 stellt die zeitlichen Bereiche und Grenzen für eine konkrete Situation dar.<sup>57</sup> Deutlich wird, dass neben der hier verwendeten technischen Maßzahl TTC für den Verkehrskonflikt zwei weitere entscheidende Kriterien zur Systemauslösung existieren. Zum einen sind dies Annahmen über die Möglichkeit des Fahrers noch einzuschreiten. Sie leiten sich aus psychologischen Untersuchungen ab und sind jeweils herstellerabhängig. Zum anderen sind es Verfahren der Kritikalitätsberechnung, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

Um zu unterscheiden, ob eine Kollision durch ein Ausweichen oder ein Abbremsen vermieden werden kann, werden jeweils zwei Fälle betrachtet.

<sup>56</sup>Vergleiche Maurer (2012b, Abschnitt 4.1) zum „CU-Criterion“ (CU: collision unavoidable, engl. für Kollision unvermeidbar).

<sup>57</sup>Die Berechnung der Grenzen und der Kurvenverlauf sind angelehnt an Brännström et al. (2010) und Brännström et al. (2011). Die konkreten Zeitpunkte der Eingriffsschwellen sind angelehnt an Winner (2012) und jeweils herstellerabhängig.



**Abbildung 2.9:** Eingriffszeiten eines universellen Handlungskonzepts zur Unfallfolgenminderung im Längsverkehr in Anlehnung an Brännström et al. (2011) und Winner (2012)

Mit Ausweichen ist dabei eine Unfallvermeidung durch ein reines Lenkmanöver gemeint. Eine Reihe weiterer Fälle ergibt sich durch die Kombination aus Lenk- und Bremsmanöver. Im Bereich niedriger Geschwindigkeiten, bei der die Grenze zur Unfallvermeidung durch Bremsen unter der des Lenkens liegt, sind diese Fälle zwischen den beiden Grenzen angesiedelt. Für höhere Relativgeschwindigkeiten, bei der die Grenze zur Unfallvermeidung durch Bremsen unter der vom Lenken liegt, führt die zusätzliche Verzögerung zu einer optimierten Nutzung des Kraftschlusspotenzials und damit zu einer Verschiebung der Grenze zum Ausweichen nach unten, unter den eingezeichneten

neten Verlauf. Der benötigte Versatz zum Ausweichen ist abhängig von der Breite des Hindernisses.<sup>58</sup>

Die vier Kurven in Abbildung 2.9 beschreiben jeweils eine Grenze zur Unfallvermeidung. Sie sind unterteilt in zwei Kategorien. Die Grenze zur Unfallvermeidung durch den Fahrer ist das theoretische Optimum für einen durchschnittlichen Fahrer, der zum letztmöglichsten Zeitpunkt ausweicht. Die Grenze, ab der eine signifikante Beschleunigung benötigt wird, ist je nach verbauter Aktorik der letztmöglichste Zeitpunkt für einen automatischen Eingriff. Zugleich markiert diese Grenze den Übergang zu ungewöhnlich starken Fahrmanövern durch den Fahrer. Dies kann ein Indiz dafür sein, dass der Fahrer nicht angemessen reagieren wird bzw. eine besondere Unterstützung benötigt. Die theoretische fahrphysikalische Grenze ist aus Übersichtsgründen nicht eingezeichnet, liegt aber nur wenig darunter.

Ab einer Geschwindigkeit von ca. 45 km/h ist die benötigte TTC zum Ausweichen geringer als die benötigte Zeit zur Unfallvermeidung durch eine Bremsung. Parallel eingetragen sind heute übliche Schwellenwerte zur Auslösung der unterschiedlichen Eingriffsstufen. Die farblich gefüllten Bereiche geben an, in welchen Bereichen automatische Bremseneingriffe erfolgen. Daran wird deutlich, dass eine feste zeitliche Parametrierung der Auslösung für niedrige Geschwindigkeitsbereiche aufgrund der geringen TTC und der nicht mehr zu erwartenden Fahrerhandlung leichter umzusetzen sind, als für hohe Geschwindigkeiten. Zur Unfallvermeidung mittels Bremsung muss die Systemaktivierung bei Geschwindigkeiten über 55 km/h mehr als eine Sekunde vor der Kollision erfolgen. Zu diesem Zeitpunkt<sup>59</sup> hat der Fahrer noch die Möglichkeit den Unfall durch eigenständiges Eingreifen zu vermeiden. Zugleich besteht eine hohe Unsicherheit bezüglich der Handlungsmöglichkeiten des kritischen Objekts, auf das reagiert wird. Für dieses besteht beispielsweise die Möglichkeit durch Abbiegen oder Fahrstreifenwechsel die Situation zu entschärfen. Um das Dilemma<sup>60</sup> zwischen möglichst später Auslösung und

---

<sup>58</sup>Die hier als Referenz verwendete Situation beschreibt den Fall, dass das Fahrzeug auf ein stehendes Zielfahrzeug ohne bestehenden lateralen Versatz auffährt.

<sup>59</sup>Vergleiche dazu Abschnitt 3.1 der ISO 15263 (2013) bzw. die E/E-CE/324/Rev.2/Add.130 (2013) (insbesondere Abschnitt 5.5.1.), die zwar nicht für die M<sub>1</sub> gilt, aber diese Punkte für Lkw gezielt anspricht.

<sup>60</sup>Lucas et al. (2008) bezeichnen dies als „warning dilemma“, vergleiche auch Maurer (2012b).

hohem Systemnutzen zu lösen, werden neben den Assistenzsystemen zur Unfallfolgenminderung Systeme zum automatischen Ausweichen und zur Ausweichunterstützung entwickelt.

Erkennt der Fahrer eine Gefahrensituation und versucht er den Unfall durch ein Lenkmanöver zu vermeiden, wird durch diese Systeme<sup>61</sup> ein angepasstes zusätzliches Lenkmoment aufgeprägt, um eine fahrstabile und zugleich ausreichende Trajektorie abzufahren. Dabei gilt es nicht nur das Lenkmoment zu erhöhen, um einen größeren Versatz schneller aufzubauen, sondern insbesondere auch um eine Begrenzung der Lenkbewegung, um das Risiko des Überschlagens von Fahrzeugen mit ABS zu verringern.<sup>62</sup> Ein System zum automatischen Ausweichen kann diese Fahrmanöver auch vollautomatisch durchführen.<sup>63</sup>

Die Erweiterung dieser Systeme durch verbesserte Sensorik, beispielsweise durch C2X Kommunikation, ist Gegenstand aktueller Arbeiten. Einen Ausblick auf die Zukunft erlauben die Projekte zum automatischen und autonomen Fahren mit dem Ziel den Fahrer für lange Streckenabschnitte oder sogar vollständig von der Fahraufgabe zu befreien.

## **2.3 Kritikalitätsberechnung und Unfallschwereprognose**

### **Kritikalitätsberechnung**

Zur Bestimmung der Auslösezeitpunkte einer Warnung bzw. eines Eingriffs ist eine Bewertung der aktuellen Verkehrssituation und ihrer Entwicklung notwendig. Das automatische Erkennen eines Verkehrskonflikts ist Aufgabe der Situationsanalyse. Es sind verschiedene Verfahren der Situationsanalyse zur

---

<sup>61</sup> Beispielsweise das „Emergency Steer Assist“ (ESA) von Continental (Continental AG 2010), vergleiche dazu auch Stählin (2008).

<sup>62</sup> Evans (1995; 1998) kann ein erhöhtes Risiko zum Überschlagen für Fahrzeuge mit ABS nachweisen.

<sup>63</sup> Vergleiche dazu die Ergebnisse des Projekts PRORETA, beispielsweise in Isermann et al. (2012).

Bestimmung der Kritikalität bekannt. Herrmann et al. (2012) unterscheiden die Ansätze für Kollisionswarnsysteme anhand von vier Kriterien<sup>64</sup>:

**Fahrphysikalisch:** Wird das physikalisch Mögliche, das realistisch Mögliche oder die Komfortzone des Fahrers betrachtet?

**Situationsvielfalt:** Werden eine oder mehrere mögliche Entwicklungen einer Szene betrachtet?

**Situationsunsicherheit:** Wird eine Gleichverteilung bei der Prädiktion der Situationsentwicklung oder eine andere Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen?

**Kartendaten:** Wird die Situation unter Zuhilfenahme von digitalen Karten betrachtet?

Zusätzlich ist noch die explizite Berücksichtigung des Fahrers bzw. eine Kombination der Ansätze möglich:

**Fahrzeugführer:** Wird der aktuelle Zustand des Fahrers (Aufmerksamkeit, Blickwinkel, medizinischer Zustand) betrachtet?

**Kombination:** Werden mehrere Ansätze zu einem Ergebnis fusioniert?

Lages (2000) bewertet die Ausweichmöglichkeiten in einem Verkehrskonflikt mit längsbewegten und stehenden Hindernissen durch Annäherung der Ausweichtrajektorie mit Kreissegmenten. Ist keine überschneidungsfreie Trajektorie möglich, wird eine Notbremsung ausgelöst. Kopischke (2000) und Ameling (2002) verbessern diesen Ansatz, indem sie Splines bzw. Klothoiden verwenden. Jansson et al. (2002) präzisieren die Objekte des Umfelds, zusätzlich zur geraden Bewegungsrichtung, auf Kreissegmente zur Kritikalitätsbestimmung. Auf diesen Verfahren baut Busch (2004) auf und verbessert die Ausweichtrajektorien anhand von untersuchten, im Feld auftretenden, Ausweichtrajektorien realer Fahrzeuge. Zur besseren Bewertung der Trajektorien vergleicht Karrenberg (2008) den benötigten Reibwert und bewertet die Kritikalität anhand des geringsten möglichen Werts. Kämpchen et al. (2009) bestimmen für alle prädierten Trajektorien einen sogenannten Kollisionsindex, anhand dessen die Kritikalität angegeben wird. Reichel et al. (2010) füllen ein Grid (Belegungskarte) mit den Daten der maschinellen Wahrneh-

---

<sup>64</sup>Einteilung und Beschreibung in Anlehnung an Herrmann et al. (2012).

mung. Die Kritikalität wird anhand der benötigten Beschleunigungen für die letzte verbleibende kollisionsfreie Trajektorie bestimmt.

Dieser, allein anhand der maschinellen Wahrnehmung bestimmten Kritikalität, wurden sukzessive weitere Eingangsinformationen hinzugefügt. Knaup & Homeier (2010) verwenden die Information aus digitalen Karten, um mögliche Trajektorien im Kreuzungsbereich zu plausibilisieren und kombinieren diese mit fahrphysikalischen Annahmen. Unter der Annahme möglichst kooperativer Verkehrsteilnehmer entwickeln Eidehall & Petersson (2008) mittels Monte-Carlo-Simulationen optimierte Fahrdynamikmodelle bewegter Hindernisse. Althoff et al. (2009) entwickeln eine Pfadplanung für autonome Fahrzeuge, die statistische Erreichbarkeitsmengen verwendet, um das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer vorherzusagen.

Ein Fahrermodell, das unterschiedliche Fahrertypen antizipiert, wird zur Prädiktion der Trajektorien des eigenen Fahrzeugs an der Kreuzung von Magas et al. (2007) verwendet. Fahrermodelle werden von Sandblom & Brännström (2011) zur Bewertung der Kritikalität der notwendigen kollisionsfreien Trajektorie genutzt. Dabei wird die Beherrschbarkeit durch den Fahrer als Maßzahl für die Kritikalität verwendet. Mirwaldt et al. (2012) verbinden die Auslösung eines Eingriffs mit einer medizinischen Ursache, die den Fahrer davon abhält die Fahraufgabe wahrzunehmen.<sup>65</sup>

Die Kombination aus Fahrerintention, Karten und Komfortzonen des Fahrers bezüglich der Längs- und Querdynamik werden von Herrmann & Schroven (2012) verwendet, um Konfliktzonen an Kreuzungen zu bewerten. Dabei wird die Kritikalität durch die Aufenthaltswahrscheinlichkeit mehrerer Objekte in einem bestimmten Zeitfenster ermittelt. Lefèvre et al. (2012) zeigen, dass eine Kritikalitätsberechnung im Kreuzungsbereich stark durch den Kontext der Verkehrssituation beeinflusst wird. Anhand von Beispielen wird gezeigt, wie eine Kritikalitätsberechnung durch die Fusion von Sensordaten und Straßentopologie verbessert werden kann.

---

<sup>65</sup>Vergleiche auch die ausführliche Diskussion in Mirwaldt (2014).

### Unfallschwereprognose

Unter dem Begriff Unfallschwereprognose versteht man Verfahren zur Prädiktion charakteristischer Merkmale eines Unfalls bzw. einer Kollision. Die Unfallschwere einer Fahrzeug-Fahrzeug Kollision hängt wesentlich vom Massen- und Steifigkeitsverhältnis<sup>66</sup> der Fahrzeuge sowie dem Vektor der Geschwindigkeitsänderung in der Kollision ab (Woolley & Asay 2008). Kramer (2009, Kapitel 2) gibt eine ausführliche Auflistung und Beschreibung der Bewertungsgrößen. Diese beschreiben die *Veränderung des Bewegungsverhaltens*, die *Deformation von Fahrzeugstrukturen* und die *Intrusion* in die Fahrgastzelle zur Charakterisierung der Unfallschwere.

Die **technische Unfallschwereprognose** bestimmt beispielsweise anhand von Sensordaten während oder vor einer Kollision einen zu erwartenden Impulsverlauf. Erste Systeme waren Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer, die ab einer bestimmten Beschleunigung die vorhandene Gurtlose pyrotechnisch reduzierten bzw. den Gurt abrollten.<sup>67</sup> Ebenso werden Airbags beim Überschreiten von Beschleunigungsmesswerten gezündet. Sala & Wang (2003) entwickeln einen Algorithmus, um während einer Frontalkollision kontinuierlich die Unfallschwere zu bewerten und einen mehrstufigen Airbag gezielter auszulösen. Wallner et al. (2010) simulieren auf Umfelddaten basierend mit einem vereinfachten Multi-Body-Model erwartete Fahrzeugdeformationen zur optimierten Ansteuerung von Rückhaltesystemen. Dirndorfer (2011) untersucht die Verbesserung von Auslösezeiten, Robustheit und Adaptivität von Rückhaltemitteln mittels Fusion der Bordsensorik während der Kollision sowie vorher ermittelter Umfelddaten.

Die **medizinische Unfallschwereprognose** bestimmt anhand der technischen Beschreibung der Kollision die zu erwartende Verletzungsschwere. Die bisher bekannten Verfahren leiten diese aus der technischen Beschreibung der

---

<sup>66</sup>Das gestoßene Fahrzeug muss dabei so steif sein, dass seine Fahrgastzelle nicht zerstört wird. Mit steigender Steifigkeit sinkt jedoch die über die Deformation abgebaute Energie und es kommt zu höheren Impulsen, die wiederum als Beschleunigung negativ auf die Insassen wirken.

<sup>67</sup>Für Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer kann Walz (2003) unabhängig von der eingesetzten Technik eine Effektivität bei Crashversuchen nachweisen. Lu et al. (2011) können für Gurtkraftbegrenzer nicht aber für Gurtstraffer eine Feldeffektivität nachweisen. Für Gurtstraffer können Viano et al. (2012) im Schlittenversuch ebenfalls keine Effektivität nachweisen.

Kollision ab.<sup>68</sup> Dischinger et al. (1998) untersuchen den Zusammenhang zwischen  $\Delta v$  und den daraus resultierenden medizinischen Komplikationen. Risikokurven für Brustverletzungen werden anhand verschiedener  $\Delta v$  Bereiche von Winnicki & Eppinger (1998) im Zusammenhang mit einer Bewertungsmethodik zur Verbesserung mittels Anpassung der Airbag-Auslösedauer vorgestellt. Der URGENCY Algorithmus errechnet, basierend auf statistischen Unfalldaten, anhand des  $\Delta v$  eine Verletzungswahrscheinlichkeit (Augenstein et al. 2004). Gabauer & Gabler (2008) argumentieren, dass  $\Delta v$  keine ausreichende Korrelation mit der Verletzung der Insassen zulässt, ohne Berücksichtigung weiterer Eigenschaften der Fahrzeugstruktur und Leistungsfähigkeit der Rückhaltesysteme.<sup>69</sup> Für die Unfallanalyse ist neben der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  auch die Angabe der in der Kollision umgesetzten Energie als EES gebräuchlich.<sup>70</sup> Brehme (2008) betrachtet die Fahrzeugdeformationen und schätzt daraus AIS3 Verletzungen, um das Rettungswesen bei der Beurteilung am Unfallort zu unterstützen.<sup>71</sup>

Allgemein bestimmen die Verfahren eine Verletzungswahrscheinlichkeit  $P_{\text{Verletzung}}$  über die Abhängigkeit zu einer bestimmbar bzw. berechenbaren Proxyvariable<sup>72</sup>, die die umgesetzte Energie beschreibt (z.B.  $\Delta v$  oder EES)

---

<sup>68</sup>Maßgeblich zur Bestimmung der medizinischen Unfallschwere sind neben den Eigenschaften der Kollision und des Fahrzeugs die Sitzposition und richtige Benutzung der Rückhaltesysteme, aber vor allem auch die Eigenschaften der Insassen, insbesondere das Alter, die Größe, das Geschlecht und das Gewicht. Vergleiche Evans (2004, Kapitel 1, 6 und 7). Vergleiche <sup>191</sup> für eine Auflistung der Faktoren.

<sup>69</sup>Kent (2001, Kapitel 1.3) diskutiert die verschiedenen Maßzahlen zur Vorhersage von Thorax-Verletzungsschwere durch Rückhaltesysteme im Detail. Diese setzt sich aus der knöchernen Verletzungswahrscheinlichkeit und der Lungenkontusion zusammen. Ein guter Indikator ist die prozentuale Brustkompression (Kent & Patrie 2004).

<sup>70</sup>Der Energy Equivalent Speed (EES) ist eine „Geschwindigkeitsangabe [...], die stellvertretend für die am Fahrzeug verrichtete Verformungsarbeit steht.“ (Burg & Zeidler 1980). Zur Bestimmung des EES eines Unfalls sind Strukturinformationen über das Fahrzeug notwendig, die von einigen Herstellern zur Verfügung gestellt werden. Vergleiche auch die Arbeit von Zeidler (1982, Kapitel 2.5 - 2.7), die sich ausführlich mit der Herleitung und Korrelation zur Verletzungsschwere beschäftigt. Vergleiche auch das auf Unfalldaten basierte EES-Fahrzeugmodell von Erbsmehl (2014).

<sup>71</sup>Vergleiche auch die Zusammenfassung der Methodik in Brehme et al. (2010).

<sup>72</sup>Eine Proxyvariable misst bzw. beschreibt eine leicht und mit hoher Güte zu messende Eigenschaft, um eine Aussage über eine schwer bzw. nicht zuverlässig zu messende Eigenschaft zu treffen.



sowie über die Einwirkung und Richtung dieser Energie:

$$P_{\text{Verletzung}} = f(\text{Energie}, \text{Einwirkung}).$$

Grundlegend besteht ein monotoner Zusammenhang, bei dem mit steigender Energie auch die Verletzungswahrscheinlichkeit steigt:

$$\text{Energie} \uparrow \Rightarrow P_{\text{Verletzung}} \uparrow.$$

Schwieriger ist die Beurteilung der Art und Richtung der Einwirkung, die von Impulsrichtung, -höhe, -verlauf und -größe abhängt. Die Kräfte wirken zudem über eine in Größe und Beschaffenheit variable Kontaktfläche auf den Körper ein. Die Umrechnung der Fahrzeug-Fahrzeug Kollision in diese Parameter kann zurzeit nur offline in FEM-Simulationen berechnet oder statistisch verallgemeinert werden.

Bisher ist kein Verfahren bekannt, das eine Kritikalitätsberechnung mit einer Unfallschwereprognose kombiniert, um eine vollständige Risikobewertung der Verkehrssituation vorzunehmen. Eine solche Risikofunktion ist Bestandteil des in dieser Arbeit vorgestellten Systems. Die dafür benötigte automatische Unfallschwereprognose wird anhand einer Risikofunktion für die untersuchten Szenarien approximiert. Eine automatische Prognose der medizinischen Unfallfolgen ist in Echtzeit mit vielen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere die individuellen Einflüsse unterschiedlicher Insassen erlauben derzeit keine zuverlässige Berechnung in der Pre-Crash Phase.

## 2.4 Funktionale Systemarchitektur und Entwicklungsmethodik

Die praktische Umsetzung der vorliegenden Arbeit basiert auf der Fusionsarchitektur und dem modularen FAS-Baukasten der Volkswagenforschung<sup>73</sup> für die Objektwahrnehmung, Regelung und Einbindung in die Entscheidungsfindung. Insofern leistet sie keinen grundsätzlichen neuen Beitrag, sondern ist

---

<sup>73</sup>Zur Einführung in die Architektur der Volkswagenforschung vergleiche Dietmayer et al. (2005).

vielmehr eine Erweiterung im Rahmen der Entscheidungsfindung in Kreuzungssituationen. Das Konzept kann damit auch auf andere Architekturen übertragen werden. Dennoch ist vor dem Hintergrund einer steigenden Anzahl von Fahrerassistenzsystemen in zukünftigen Fahrzeuggenerationen die Zielarchitektur bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Im Falle der hier beschriebenen Form der Kreuzungsassistenz kann es beispielsweise zu Problemen bei der Verhaltensentscheidung durch konkurrierende Funktionen kommen.

Matthaei & Maurer (2015) stellen eine hybride Architektur vor, die einen sequentiellen Ansatz<sup>74</sup> mit parallelen, verhaltensbasierten Ansätzen kombiniert. Dieser Architekturvorschlag gilt nicht nur für autonome Fahrzeuge, sondern ist auch für Fahrerassistenzfunktionen geeignet. Dabei können im Falle eines Fahrerassistenzsystems die nicht benötigten Teile entfallen. Abbildung 2.10 zeigt alle Komponenten der vorgeschlagenen Architektur. Drei horizontale Ebenen (strategisch, taktisch und operativ) gliedern die Architektur grundlegend (unter anderem) anhand des jeweiligen Betrachtungszeitraums, der Genauigkeiten (Auflösungen räumlich und zeitlich), der durchgeführten Aufgaben und der Zykluszeiten. In vertikaler Richtung werden die globale Lokalisierung, Modellierung und Verarbeitung extern generierter Daten, Umfeldwahrnehmung und Missionsdurchführung unterschieden. (Matthaei & Maurer 2015)

Die hier vorliegende Arbeit ist in der praktischen Umsetzung komplett regelbasiert<sup>75</sup> entwickelt worden. Bei der Einbindung in ein Gesamtfahrzeug ergibt sich ein Unterschied zu bisherigen unfallfolgenmindernden Systemen am Markt. Diese haben als hierarchische Systeme<sup>76</sup> im Allgemeinen die Regel unmittelbar vor der Kollision oder bei großen Bremsdruckanstiegen eine Vollbremsung auszulösen oder aufgrund von Unsicherheiten bei der Wahrnehmung bzw. einer Fahrerhandlung diese Auslösung zu unterdrücken.

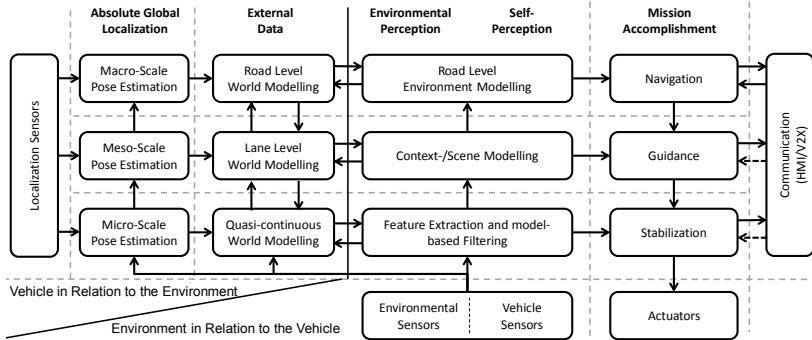
Im Unterschied dazu führt das hier vorliegende Konzept zu einer situativen Verhaltensentscheidung, die sich als Voll- aber auch als Teil-/Zielbremsung

---

<sup>74</sup>Verwendet wird ein vierstufiger Ansatz: Sense-Model-Plan-Act (SMPA).

<sup>75</sup>Vergleiche Heck (2009, Kapitel 2.3.3) für eine Übersicht der Entscheidungsverfahren.

<sup>76</sup>Hierarchische Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass eine höhere Entscheidungsebene eine niedrigere Ebene übersteuern kann (Maurer 2013). Vergleiche auch Mesarović et al. (1970, Kapitel 2.1).



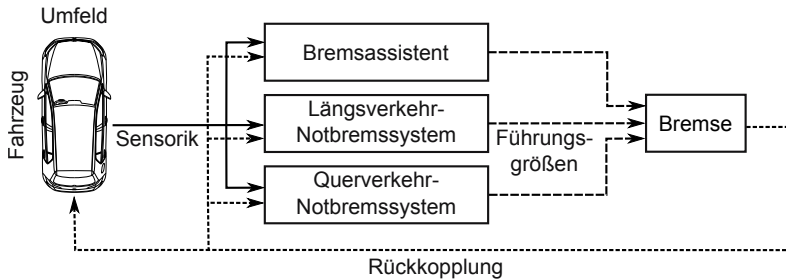
**Abbildung 2.10:** Funktionale Systemarchitektur für ein autonomes Straßenfahrzeug (Matthaei & Maurer 2015)

bzw. durch gar keine Bremsung ausdrücken kann. Entsprechend wird gefordert, dass andere Funktionen im Gesamtfahrzeug, beispielsweise das Bremsensteuergerät oder andere Notbremsfunktionen, dieses Verhalten nicht automatisch übersteuern.

Im Sinne der funktionalen Architektur von Matthaei & Maurer (2015) wird damit ein Beitrag auf der taktischen Ebene geleistet, indem zusätzliche semantische Informationen zur Bewertung des Kontextes der Situation genutzt werden. Diese Informationen sind a priori als Kennfelder zur Unfallschwere für bestimmte Kollisionskonfigurationen gespeichert und werden situativ zur Bewertung und Handlungsgenerierung genutzt.<sup>77</sup>

Maurer (2012a) verweist auf den von Glaser (2006) und ihm vorgestellten systematischen Entwurfsprozess für Fahrerassistenzsysteme. Der Prozess beschreibt das Vorgehen für die Entwicklung einer einzelnen Funktion als Produkt für den Serieneinsatz. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an dem genannten Vorgehen, indem sie die dort genannte erste Iterationsschleife („Motivation, Funktionsdefinition, Produktsicherheit und Human Factors“) im Rahmen eines Forschungssystems zu beantworten sucht.

<sup>77</sup> Vergleiche Abschnitt 4.2.



**Abbildung 2.11:** Bremsvorgaben durch mehrere unabhängige Funktionen können zu einer undefinierten Überlagerung oder durch Rückkopplung zu einer ungewollten Verstärkung führen.

Bei der heutigen Entwicklungsmethodik, bei der Funktionen als unabhängige Module entwickelt werden, ist von einer Interaktion der einzelnen Funktionen und damit einer möglichen Überlagerung der Führungsgrößen für die Aktuatorik auszugehen. Dabei können zwei Probleme auftreten. Zum einen können zwei gegensätzliche Vorgaben für die Aktuatorik vorgegeben werden (Teilbremsung vs. Vollbremsung) und zum anderen kann eine ungewollte Verstärkung (Bremsassistent verstärkt Teilbremsung) auftreten. Abbildung 2.11 verdeutlicht das Problem, bei dem zwei Notbremsfunktionen und eine Bremsassistentenfunktion Führungsgrößen an die Bremse schicken können. Eine Rückkopplung erfolgt über die Eingaben an die Funktion, die sowohl von der Bremse (Bremsdruck, Bremsdruckänderung) als auch vom Fahrzeug (Verzögerung, Geschwindigkeit) abhängen.

Allgemein bleibt anzumerken, dass es für zukünftige Systeme ratsam erscheint frühzeitig die Abhängigkeiten zu anderen Funktionen und damit nicht nur das spätere Zusammenspiel in Hardware auf den Bremsen- und Lenkungssteuergeräten für alle Fahrerassistenzfunktionen zu prüfen. Schon bei der Funktionsdefinition sollten die impliziten Interaktionen mit anderen Funktionen berücksichtigt werden, insbesondere im Hinblick auf eine vollständige Gefahren- und Risikoanalyse nach ISO 26262. Da Maurer sich auf die Konzept- und Produktentwicklungsphase beschränkt, fehlen die Bereiche Produktion und Betrieb („After SOP“). Bei steigender Komplexität und kür-

zeren Innovationszyklen stellt sich daher die Frage, wie sowohl Updates als auch Funktionserweiterungen an Fahrzeugen im Feld vorgenommen werden können und wie im Feld auftretende Fehler Einfluss in den Entwicklungsprozess finden. Möglicherweise ließe sich daher der bestehende Kreis um eine weitere Eingangsgröße „Erfahrung aus Produktiveinsatz“ ergänzen.

## 2.5 Fahrerassistenz an der Kreuzung

Kreuzungsassistenten beschreibt den Bereich der Assistenzsysteme, der einen Fahrzeugführer im Bereich der Kreuzung unterstützt. Mages et al. (2012) geben die Fahrfehler im Bereich der Kreuzung nach Hoppe et al. (2007) und PReVENT (2005) an. Staubach (2009a;b) untersucht anhand der GIDAS Fallakten die Ursachen. Fehlinterpretationen, Unaufmerksamkeit und mangelnde Berücksichtigung möglicher Sichtbehinderung sind in allen Quellen die hauptsächlichen Ursachen für Unfälle im Kreuzungsbereich. Die bisherigen Ansätze den Fahrer zu unterstützen unterteilen sich in zwei Bereiche, zum einen in informierende Systeme auf der Planungs- und Führungsebene zur Optimierung des Verkehrsflusses bzw. des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen, zum anderen in Fahrerassistenzsysteme zur Unfallvermeidung und -folgenminderung. Eine große Rolle spielt hier der Schutz von Fußgängern und Radfahrern, wobei Systeme, die diese Unfallgegner adressieren, nicht auf den Einsatz an Straßenkreuzungen beschränkt sind. Eine weitere Differenzierung ergibt sich durch die Art der verwendeten Sensorik. Kreuzungen machen nur einen kleinen Teil der Straßentopologie aus. Zusätzlich sind Kreuzungen im urbanen Bereich zum Teil mit Infrastruktur in Form von Lichtzeichenanlagen versehen.<sup>78</sup> Daher kommen hier neben fahrzeugbasierter Sensorik und Kommunikation (C2C<sup>79</sup>) auch infrastrukturbasierte Ansätze mit (C2X<sup>80</sup>) in Betracht.

---

<sup>78</sup>Eine genaue Angabe über die Ausstattungsrate ist in Deutschland aufgrund der kommunalen Zuständigkeiten nicht möglich.

<sup>79</sup>C2C: Kurzform für „Car to Car“ Kommunikation.

<sup>80</sup>Für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur existieren eine Reihe an gebräuchlichen, synonymen Bezeichnungen und Schreibweisen. In dieser Arbeit wird die Definition des Car 2 Car Communication Consortiums (C2C-CC) verwendet. Diese definieren C2X als Abkürzung zur Bezeichnung von

Technisch entscheidend ist neben der Interpretation der Verkehrssituation die maschinelle Wahrnehmung des Umfeldes und der kreuzenden Verkehrsteilnehmer. Im Gegensatz zum Längs- oder Gegenverkehr besteht die Herausforderung hier nicht in den benötigten Reichweiten, sondern in der Erfassung von Objekten mit großem lateralem Versatz zum betrachteten Fahrzeug. Die verwendete Sensorik hat daher einen deutlich größeren Öffnungswinkel bzw. ist infrastrukturbasiert und deckt nur einen begrenzten Raum ab. Theoretisch ist es für die Systeme irrelevant, ob sich der Verkehrskonflikt im Bereich einer Kreuzung entwickelt. Jüngere Arbeiten zur Kreuzungsassistentz nutzen das Wissen über die Straßentopologie zur verbesserten Prädiktion der Verkehrsteilnehmer. Diese Berücksichtigung setzt allerdings das Vorhandensein von Kartendaten geeigneter Güte zur Plausibilisierung der Verkehrssituation voraus.<sup>81</sup>

Neben der Wahrnehmung ist eine Situationsanalyse und Prädiktion der bewegten Objekte Gegenstand der Forschung. Für einen Verkehrsteilnehmer besteht die Möglichkeit zum Bremsen und Beschleunigen sowie zu einer Trajektorienveränderung durch Lenken. Im Kreuzungsbereich ist, insbesondere durch die erhöhte Wahrscheinlichkeit zum Abbiegen, die Kritikalitätsberechnung schwieriger.<sup>82</sup> Gleichzeitig haben Bremsen und Beschleunigen situationsbedingt einen größeren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit zur Kollision. Im Querverkehr sind die Orte, an denen sich die Objekttrajektorien räumlich überschneiden, sehr begrenzt. Für eine Kollision müssen sich die Fahrzeuge räumlich und zeitlich treffen. Im Gegensatz zum Längsverkehr hat damit bereits eine geringe Veränderung der Geschwindigkeit eine größere Auswirkung darauf, ob zwei Objekte sich räumlich und zeitlich treffen.

Die bisherigen Handlungskonzepte konzentrierten sich im Wesentlichen auf Warnungen und Unfallvermeidung. Unfallfolgenminderung im Querverkehr wurde bisher nur als einfaches Notbremskonzept mit Vollbremsung bei einer unvermeidbaren Kollision umgesetzt (s.u.). Eine detaillierte Berücksichtigung

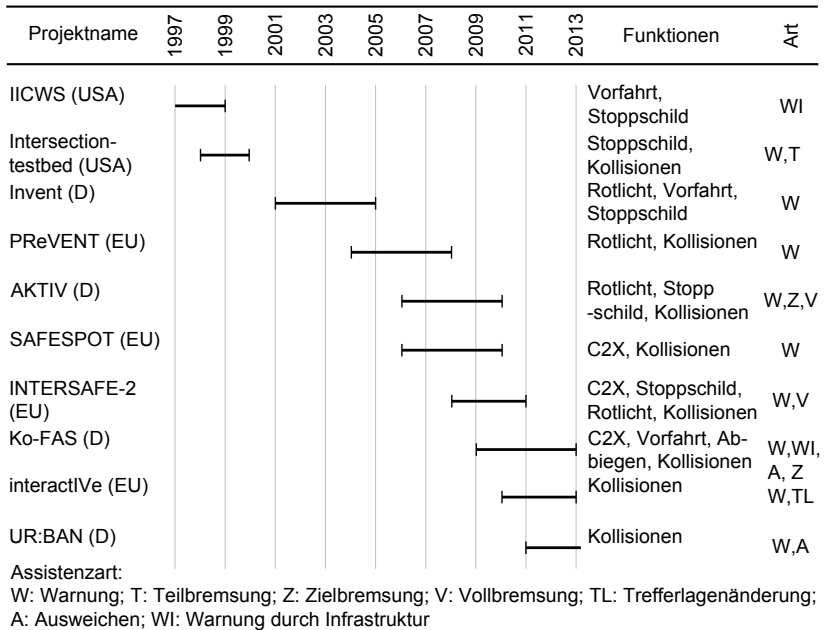
---

Interaktionen zwischen Fahrzeugen bzw. zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Eine Einführung in die bisher erfolgten Arbeiten, Aufbau und Verfahren in diesem Bereich gibt C2C-CC Manifest (C2C-CC 2007).

<sup>81</sup>Vergleiche Knaup (2012), Althoff et al. (2009) und Eidehall & Petersson (2008).

<sup>82</sup>Vergleiche den Ansatz zur Prädiktion von Aufenthaltsgebieten von Herrmann & Schroven (2012).

sichtigung der daraus resultierenden Konsequenzen fand nicht statt. Neben der Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer adressieren Handlungskonzepte im Kreuzungsbereich auch Infrastruktureinrichtungen. Stoppzeichen und Lichtzeichenanlagen<sup>83</sup> werden dafür erfasst und durch eine entsprechende Warnung bzw. einen Bremseneingriff soll ein Verkehrsverstoß verhindert werden. Dieser präventive Ansatz zur automatischen Einhaltung von Verkehrsregelungen ist bisher nur im Bereich der Kreuzungsassistenz zu finden.



**Abbildung 2.12:** Übersicht der hier vorgestellten Forschungsprojekte zur Fahrerassistenz an der Kreuzung.

Nach den ersten Seriensystemen von Daimler und Volvo (s.u.) sind zukünftig in diesem Bereich weitere Systeme zu erwarten. Bisher sind aber aus-

<sup>83</sup> Im Folgenden als Stopp Schild- und Rotlichtassistenz bezeichnet.

schließlich die Funktionsweisen der Forschungsansätze genauer bekannt. Die Hersteller beschränken sich derzeit auf sehr grobe Funktionsbeschreibungen. Die bisherigen Beiträge erfolgten daher überwiegend im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsprojekten. Abbildung 2.12 stellt die Projekte der jüngeren Vergangenheit zur Übersicht im zeitlichen Verlauf dar. Die hier vorgestellte Auswahl beschränkt sich auf Projekte, in denen Funktionen mit Fahrdemonstration zur Unfallvermeidung oder Unfallfolgenminderung gezeigt wurden.

### **Deutschland und Europa**

#### **INVENT 2001-2005**

Das nationale Projekt „Intelligent Traffic and User-Friendly Technology“ (INVENT) war ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes nationales Projekt. Relevant im Bereich der Kreuzungsassistenten war das Teilprojekt „Vorausschauende Aktive Sicherheit“ (VAS). In Kooperation mit Projekten zur Wahrnehmung und Untersuchung von Mensch-Maschine-Interaktion<sup>84</sup> wurden ein Rotlichtassistentensystem und ein System zum Schutz vor Vorfahrtsmissachtungen entwickelt (INVENT 2003). Zusätzlich wurden diese Systeme um Funktionen zur Vermeidung von Abbiegeunfällen erweitert. Die Vorstellung erfolgte in zwei Demonstratorfahrzeugen mit Warnung, Bremsung und Lenkunterstützung zum Ausweichen. Meitinger et al. (2004)<sup>85</sup> stellen die implementierte Stoppschildassistenten, Lindner et al. (2004) die Rotlichtassistenten vor.

#### **PReVENT 2004-2008**

Das von der europäischen Kommission geförderte Projekt „Preventive Safety“ (PReVENT) hatte zum Ziel durch frühe und präventive Eingriffe die Verkehrssicherheit zu steigern. Der sogenannte virtuelle Sicherheitsgurt adressiert eine Reihe an Verkehrskonflikten im Straßenverkehr (PReVENT 2005).

---

<sup>84</sup>Vergleiche Teilprojekte: Fahrzeugumgebungserfassung und Interpretation (FUE), Fahrerassistenten- und Mensch-Maschine-Interaktion (FVM).

<sup>85</sup>Vergleiche auch Meitinger (2008) und Mages et al. (2012).



Im Bereich der Kreuzungsassistenz erfolgte ein Beitrag im Teilprojekt INTERSAFE (Fuerstenberg & Rössler 2005). Im Projekt wurden zwei Ansätze verfolgt, eine Funktionsumsetzung im Simulator mit idealen Sensoren sowie eine Umsetzung im Fahrzeug, basierend auf Lasersensorik und C2X Kommunikation. Mittels dieses als „Basic System Approach“ bezeichneten Ansatzes wurde ein System zur Warnung und Unfallvermeidung im Fahrzeug umgesetzt (Schulze et al. 2005). Chen et al. (2007) kommen nach Evaluation im Probandenversuch zu dem Ergebnis, dass die angebotene Kreuzungsassistenz mehrheitlich positiv empfunden und als Beitrag zur Verkehrssicherheit gesehen wird. Es wird allerdings keine Objektivierung hinsichtlich eines Nutzens im Unfallgeschehen bzw. der tatsächlichen Feldeffektivität vorgenommen.

### **AKTIV 2006-2010**

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und BMBF geförderte Projekt „Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr“ (AKTIV) war der Nachfolger des INVENT Projekts. Schwerpunkt des eigenständigen Teilprojekts „Kreuzungsassistenz“ war die Reduktion der Unfälle an Kreuzungen, insbesondere beim Überqueren und Ein- bzw. Abbiegen. Die Bordsensorik basierte auf Lasersensoren und Stereokamerasystemen. Zusätzlich wurden C2C Kommunikation und digitale Karten mit DGPS<sup>86</sup> Referenz verwendet. Insgesamt wurden vier Demonstrator-Fahrzeuge, darunter ein Motorrad, aufgebaut. In verschiedenen Szenarien konnten Warnstrategien bis hin zum automatischen Eingriff gezeigt werden. Dabei wurde ein Fahrzeug entweder vor dem Erreichen einer Halte- oder Stopplinie in den Stand gebremst oder eine undifferenzierte Gefahrenbremsung kurz vor Kollision ausgelöst (AKTIV 2010).

### **SAFESPOT 2006-2010**

„Cooperative Systems for Road Safety“ (SAFESPOT) war ein von der Europäischen Kommission gefördertes Projekt, das sich wesentlich mit den Möglichkeiten zur Steigerung der Verkehrssicherheit durch C2X Kommunikation beschäftigt hat. Ziel war es einen sogenannten „Safety Margin Assistant“ zu

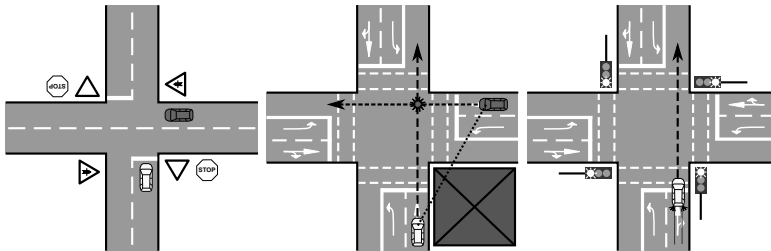
---

<sup>86</sup>Differenziell korrigiertes globales Positionierungssystem.

entwickeln. Dieser sollte durch rechtzeitige Warnungen den Fahrer vor Gefahrensituationen schützen. Die Teilprojekte „Cooperative systems applications vehicle based“ (SCOVA) und „Cooperative safety systems infrastructure based“ (COSSIB) umfassten auch Funktionen der Kreuzungsassistenten. Dabei wurden nur Warnungen ohne aktive Eingriffe in die Bremsanlage umgesetzt (Andreone et al. 2010).

## INTERSAFE-2 2008-2011

Im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts „Cooperative Intersection Safety“ (INTERSAFE-2) wurden von 2008 an sogenannte „Cooperative Intersection Safety Systems“ (CISS) entwickelt. Das Zusammenspiel von Infrastruktur- und Bordsensorik sowie die Kommunikation und kooperative Sensordatenfusion standen im Fokus der Forschung<sup>87</sup>. Diese wurden in drei Versuchsträgern von BMW, Volvo und Volkswagen demonstriert und beinhalteten eine Reihe von Warn- und Eingriffsstrategien. Im Projekt wurden unterschiedliche Sensortypen eingesetzt, die auf Radar, Laser oder Bildverarbeitung (Mono/Stereo) basierten. Auf Basis einer kooperativen Situationsanalyse und Risikobewertung wurden im Teilprojekt „Intersection Assistance for Crossing and Turning“ erstmals gezielt Situationen adressiert, bei denen es zur Kollision beim Durchfahren einer Kreuzung kommt.



**Abbildung 2.13:** Adressierte Verkehrsszenarien im Teilprojekt „intersection assistance for crossing and turning“ (INTERSAFE-2 2011)

---

<sup>87</sup>Vergleiche Knaup (2012).

Abbildung 2.13 zeigt die untersuchten Situationen, für die angenommen wird, dass der Gierwinkel bei der Anfahrt der Kreuzung gegen  $0^\circ$  geht. Der benötigte Sensoröffnungswinkel wird mit  $180^\circ$  angegeben und die Reichweite ist abhängig von der konkreten Funktionsausprägung. Funktional wurden Warnungen vor Geschwindigkeits- und Rotlichtverstößen umgesetzt (Rössler 2010). Zusätzlich wurde das Fahrzeug beim Überfahren einer roten Lichtzeichenanlage automatisch in den Stand gebremst<sup>88</sup>, bzw. ein Anfahren ganz verhindert. Bei einer drohenden Kollision mit einem anderen Fahrzeug wurde als Warnung zunächst eine audiovisuelle Warnung und darauf folgend ein haptischer Bremsruck umgesetzt. Ein Bremsingriff durch den Fahrer zu diesem Zeitpunkt wurde vom System zusätzlich verstärkt. Im Falle einer unvermeidbaren Kollision wurde eine Vollbremsung ausgelöst. Eine Diskussion der daraus resultierenden Verschiebung der Trefferlage, wie sie heute erforderlich scheint, fand in diesem Projekt nicht statt. Die Bewertung der Sicherheitsfunktionen erfolgte nur auf Basis der Geschwindigkeitsreduktion bis zur Kollision.

Abbildung 2.14 zeigt die generische funktionale Architektur der Versuchsträger. Ein Merkmal des Volkswagen-Versuchsträgers bestand darin, dass die Architektur stark modularisiert war. Der „Functional-coordinator“ wählt eine aktive Funktion aus, die, basierend auf Eingangsdaten, ein Warnlevel ausgibt. „HMI-coordinator“ und „Actor-coordinator“ sind je nach Warnelement bzw. Aktuatortyp autonom und reagieren eigenständig, basierend auf einer Warn- und Eingriffsstrategie, gezielt auf das Warnlevel. Als Teil des Projekts wurde eine öffentliche Straßenkreuzung in Wolfsburg mit Infrastruktur ausgerüstet. An dieser Kreuzung wurden umfelderfassende Sensorik sowie Kommunikationseinrichtungen zum Übermitteln der Daten und des Zustands der Lichtsignalanlagen installiert (INTERSAFE-2 2011).

### Ko-FAS 2009-2013

Bei der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsinitiative „Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption für die Präventive Sicherheit im Straßenverkehr“ (Ko-FAS) standen

---

<sup>88</sup>Eine Diskussion der möglichen negativen Konsequenzen, beispielsweise durch Stehenbleiben auf der Kreuzung, wurde nach Kenntnis des Autors nicht geführt.

kooperative Ansätze im Fokus. Ziel war es „ein gemeinsames Verständnis der Verkehrssituation“ zu entwickeln, um „Gefahrensituationen vorab mit kooperativer Sensorik und kooperativer Perzeption zu entschärfen“ (Forschungsinitiative Ko-FAS 2013). Im Rahmen des Teilprojekts Ko-PER wurden Ansätze zur kooperativen Situationsanalyse untersucht. Dafür wurden die Daten der individuellen Umfeldwahrnehmung über C2X sowohl von Infrastruktur, Fahrzeugen, Radfahrern und Fußgängern miteinander geteilt. Radfahrer und Fußgänger wurden mit einem mobilen Transponder aus dem Teilprojekt Ko-TAG ausgerüstet. Das Ziel war ein gemeinsames Szenenverständnis, um darauf Systeme zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zu entwickeln (Wertheimer et al. 2014, Abschnitt 1.4 und Kapitel 3). Vergleiche Liebner et al. (2013) zu den im Projekt entwickelten Ansätzen der Fahrerintentionserkennung an Kreuzungen. Die infrastrukturbasierte Wahrnehmung und Klassifikation von Verkehrsteilnehmern wurde mit Kameras und Laserscannern durchgeführt (Strigel et al. 2013). Schwerpunkt des Teilprojekts Ko-KOMP war die Beurteilung der Systeme, insbesondere der innerstädtischen Funkqualität. Dafür wurden neben Simulationsumgebungen auch Versuchsträger mit Kreuzungsassistentenfunktionen aufgebaut. Auch psychologische Faktoren wurden untersucht, um Empfehlungen zu geben, wie Fahrer wirksam an Kreuzungen unterstützt werden können (Naujoks & Neukum 2014). Stoff & Liers (2013) beschäftigen sich in der Theorie und Simulation mit der Bewertung von Ausweichfunktionalität und berücksichtigen dabei auch den Effekt der Trefferlage. Sie weisen darauf hin, dass Ausweichmanöver, die zu Kollisionen mit der Fahrgastzelle führen, das Verletzungsrisiko erhöhen. Im Versuchsträger des Teilprojekts Ko-PER zeigten Daimler und Delphi Funktionen zur Kollisionsvermeidung durch Warnungen und autonome Bremsengriffe (Wertheimer et al. 2014, Abschnitt 3.8). Im Teilprojekt Ko-KOMP zeigten Continental und die Technische Universität Darmstadt Ausweichfunktionen mit autonomer Querverführung für seitlich einbiegenden Verkehr.

### **interactIVe 2010-2013**

Diese Arbeit entstand im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts „Accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles“ (interactIVe). Im Teilprojekt „Cost-efficient emergency inter-

vention for collision mitigation“ (EMIC) war das Ziel unfallfolgenmindernde Funktionen mit günstiger Sensorik zu entwickeln.<sup>89</sup> Im Vergleich zu vorherigen Projekten sollte eine Funktionserweiterung bei gleichzeitiger Reduktion der eingesetzten Sensoren erreicht werden. Zwei Demonstratorfahrzeuge (Continental und Volkswagen) wurden dafür aufgebaut. Continental untersuchte das Thema Ausweichunterstützung für querende Objekte. Im Volkswagen Versuchsträger wurden Systeme zur Unfallfolgenminderung für den Längs-, Quer- und Gegenverkehr umgesetzt.<sup>90</sup> Das Handlungskonzept dieser Arbeit wurde prototypisch als System zur Kreuzungsassistenz in diesem Fahrzeug umgesetzt. Die funktionale Architektur ist in Abschnitt 2.4 bereits vorgestellt worden.

### UR:BAN 2012-2015

„Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement“ (UR:BAN) ist das vom BMWi geförderte Nachfolgeprojekt von AKTIV und beschäftigt sich mit urbanem Verkehr. Im Teilprojekt „Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen“ (UR:BAN-KAB) wird untersucht, in welcher Situation ein Brems- oder aber ein Lenkeingriff einzeln oder aber in Kombination die Kollision am sinnvollsten bzw. am sichersten verhindern kann. Dafür wird eine situationsspezifische Assistenz entwickelt, um das Wirkfeld der bisherigen Notbrems- und Ausweichalgorithmen durch ein erweitertes Umfeldmodell zu vergrößern.<sup>91</sup>

---

<sup>89</sup>Diese, als „Demokratisierung“ von Fahrerassistenz bezeichnete Bestrebung, hat zum Ziel, die Verfügbarkeit von Fahrerassistenzsystemen in preissensitiven Fahrzeugklassen zu erhöhen. Dies kann „im Wesentlichen [durch] eine Reduzierung der Stückkosten, [den] Einsatz preisgünstiger Technologien und eine Mehrfachnutzung von Komponenten“ erreicht werden (Haja et al. 2009).

<sup>90</sup>Eine genaue Beschreibung der einzelnen Zielszenarien ist in Mäkinen et al. (2010) angegeben. Die Ergebnisse wurden in Heck et al. (2012b) kurz dargestellt.

<sup>91</sup>Vergleiche <http://www.urban-online.org> und die dort erhältliche Projektbeschreibung (URBAN 2012).

## USA

Im Jahr 2000 gab das Department of Transportation (USDOT) fünf Empfehlungen zur Entwicklung von Kreuzungsassistentz heraus (Pierowicz et al. 2000). Neben der Entwicklung von Sensoren mit großem Öffnungswinkel sollten die Möglichkeiten von C2X untersucht werden. Zusammen mit Automobilherstellern erfolgten seitdem zahlreiche Arbeiten auf dem Gebiet der Kreuzungsassistentz. Neben dem Aspekt der Sicherheit wurde untersucht, wie der Verkehrsfluss durch Kreuzungen erhöht werden kann. Anfängliche Arbeiten konzentrierten sich auf infrastrukturbasierte Möglichkeiten zur Detektion der Fahrzeuge und einer Warnung über Anzeigen am Straßenrand (Penney 1999). Zusätzlich wurden zahlreiche Studien vorgestellt, die Systeme theoretisch in der Simulation<sup>92</sup> untersuchen. Campbell et al. (2007) untersuchen die Verständlichkeit von HMI-Symbolen zur Warnung vor Rotlicht- und Stoppschildverstößen. Aoude et al. (2010) verbinden eine Kritikalitätsbestimmung mit einem Fahrermodell zur Verbesserung einer warnenden Funktion. Auf C2C basierende Protokolle zur Steuerung von Verkehrsflüssen im Kreuzungsbereich stellen Azimi et al. (2011) in Zusammenarbeit mit General Motors vor.<sup>93</sup>

## Asien

Yang et al. (2000) stellt eine erste Arbeit zur Warnung vor Querverkehrskollisionen vor. Basierend auf DGPS gestützter Ortung senden die Fahrzeuge über C2X ihre Position. Anhand eines einfachen Algorithmus werden Warnungen ausgegeben, wenn sich zwei Trajektorien schneiden. Al-Ghamdi & AlGadhi (2004) stellen einen Ansatz aus Saudi Arabien vor, bei dem mittels Infrastruktur nicht Fahrzeuge, sondern kreuzende Kamele detektiert werden. Dieses als „Camel Vehicle Collision“ (CVC) in seiner Bedeutung zunehmende Problem kann sehr viel wirksamer adressiert werden, wenn dauerhaft aufgestellte Ver-

---

<sup>92</sup>Mazzae et al. (1999) stellen im Iowa Driving Simulator fest, dass ein ABS System keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Querverkehrskollision hat.

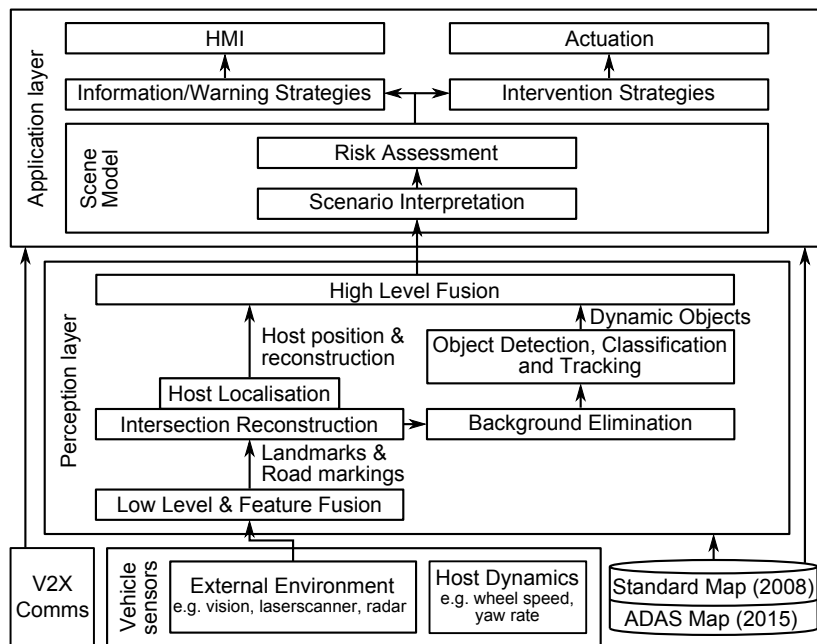
<sup>93</sup>Arbeiten die C2C Ansätze verfolgen, finden sich auch bei den anderen amerikanischen Herstellern. Vergleiche beispielsweise die Arbeit von Huang et al. (2002) in Zusammenarbeit mit Ford.

kehrsschilder durch dynamische Anzeigen abgelöst werden. Diese leuchten nur im Falle kreuzender Kamele auf. Der asiatische Raum macht deutlich, dass aufgrund der hohen Diversifikation der Verkehrsdomänen eine genaue Betrachtung der Systeme vor dem Hintergrund der adressierten Unfalltypen notwendig ist.

Die Gründe für Unfälle an Kreuzungen in Japan werden in Hiramatsu et al. (2008) untersucht. Basierend auf Unfalldaten wird eine Unfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Verkehrsteilnehmer und Kreuzungstopologie gegeben. Anhand dieser Verteilung wird die theoretisch mögliche Reduktion der Unfallzahlen für ein Kreuzungsassistenzsystem mit Infrastrukturmaßnahmen durch zusätzliche Stoppschilder und Lichtsignalanlagen verglichen. Bei 100 % Ausstattungsrates aller Fahrzeuge verglichen mit 100 % Beschilderung aller Kreuzungen würde eine Warnfunktion die Anzahl der Kollisionen um 8 % und eine Notbremsfunktion um 10 % reduzieren. Basierend auf den Daten der „Australian National Crash In-depth Study“ (ANCIS) analysieren Chen et al. (2011) die Faktoren, die zu einem Kreuzungsunfall führen. Wesentlich sind Fehleinschätzungen von Geschwindigkeiten und Abständen sowie Ablenkung der Fahrzeugführer. In 83 % der Unfälle erfolgt vorher keine Handlung<sup>94</sup> zur Unfallvermeidung. Kim et al. (2012) berücksichtigen für ein System zur Unfallvermeidung die Handlungsmöglichkeiten des gestoßenen Fahrzeugs. Dieses kann beschleunigen und abbremsen, wodurch sich der Ort der Kollision auf der Kreuzung ändert. Erstmalig wird hier differenziert betrachtet, wie sich daraus der Anstoßpunkt ändert, ohne eine daraus resultierende Auswirkung auf die Unfallschwere zu erkennen.

---

<sup>94</sup>In der Unfallrekonstruktion nur schwer feststellbar.



Generic vehicle-based system showing hierarchical architecture and relationships between sub-systems

**Abbildung 2.14:** Generische funktionale Architektur der Versuchsträger nach (INTERSAFE-2 2011)



## Mercedes Bremsassistent Plus mit Kreuzungsassistent

Im Serieneinsatz zur Unfallvermeidung bzw. -folgenminderung für Fahrzeug-Fahrzeug Kollisionen im Kreuzungsbereich gibt es bisher nur ein System<sup>95</sup> in der Mercedes S-, E- und C-Klasse. Erstmals in der neuen S-Klasse ab 2013 eingeführt, bietet Daimler damit eine Funktion an, die vor Querverkehr warnt und eine Fahrerbremsung über den Bremsassistenten unterstützen soll (Schopper et al. 2013). Schopper & Missel (2014) beschreiben das als Kreuzungsassistent bezeichnete System genauer. Die Umfeldwahrnehmung nutzt die fusionierten Daten aus der Stereokamera und der Radarsensorik. Da die Stereokamera mit 45° Öffnungswinkel angegeben ist, kann nur ein Bruchteil der im Feld auftretenden Unfälle erkannt werden.<sup>96</sup>

Das System kombiniert eine optische und akustische Warnfunktion (FV-CW), mit der zeitgleich der Bremsassistent die Bremse vorspannt (FVCC). Im Falle einer Fahrerbremsung erhöht das System „automatisch den Bremsdruck für eine wirksame Gefahrenbremsung – notfalls bis zur Vollbremsung“. Das System ist bis 72 km/h aktiv und soll zur „Verminderung von Kollisionsfolgen mit der Option auf Kollisionsvermeidung unter günstigen Umständen“ beitragen. (Schopper & Missel 2014)

Da keine genaueren Beschreibungen existieren, wurde eine Versuchsreihe<sup>97</sup> mit der neuen C-Klasse durchgeführt, um das System qualitativ besser beurteilen zu können. Diese Versuche erheben keinen Anspruch darauf das Systemverhalten genau zu beschreiben. Sie sollen vielmehr eine erste Einschätzung der bisher umgesetzten Seriensysteme geben, für die bislang keine detaillierten Informationen oder Messreihen veröffentlicht wurden.

Das Versuchsfahrzeug (C-Klasse) fuhr dabei mit ca. 40 km/h auf ein Zielobjekt zu, das mit 20 km/h orthogonal querte. Die Versuche wurden jeweils für verschiedene Trefferlagen<sup>98</sup> (ohne Eingriff) von 0 m bis 4 m in Abständen von einem Meter durchgeführt, um den Einfluss der Trefferlage zu quan-

---

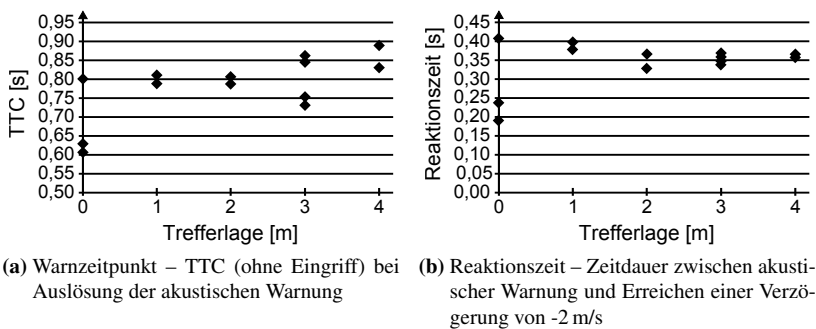
<sup>95</sup>Im neuen Volvo XC90 ist auch ein Kreuzungsassistenzsystem (FVCM) für Kollisionen mit entgegenkommendem abbiegendem Verkehr optional erhältlich (Volvo Cars 2014). Das System soll eine automatische Vollbremsung durchführen. Für das System liegen bisher keine genaueren Funktionsbeschreibungen oder praktische Erfahrungen vor.

<sup>96</sup>Vergleiche Abschnitt 3.3.1 zur Auswirkung des Öffnungswinkels auf das Wirkfeld.

<sup>97</sup>Ich möchte mich bei Andreas Jungbluth für die Bereitstellung der Versuchsdaten bedanken.

<sup>98</sup>Vergleiche Abschnitt 3.1.1 zur Definition der Trefferlage.

tifizieren. Während der Versuche wurde die Position des Zielobjekts nicht gemessen. Die Zieltrefferlage ist daher nur grob geschätzt und entsprechend ungenau. Die Entfernung zum Kollisionspunkt und die Geschwindigkeit bei Warnung wurde per Referenzsensorik gemessen.<sup>99</sup> Der Zeitpunkt der akustischen Warnung wurde im Nachgang aus einer Videoaufzeichnung ausgewertet und ist entsprechend ungenau.



**Abbildung 2.15:** Versuchsreihe zur qualitativen Beurteilung der Kreuzungsassistenz der neuen Mercedes C-Klasse. Der Versuchsaufbau und die Messmethodik werden im Text beschrieben.

Die Versuche wurden von einem trainierten Versuchsfahrer durchgeführt, der eine Geschwindigkeit von ca. 40 km/h über das Gaspedal vorgab. Die Warnzeitpunkte sind in Abbildung 2.15a angegeben und betragen  $\bar{0}(0,76 \pm 0,15)$  s. Sobald die Warnung ausgegeben wurde, hat der entsprechend aufmerksame Fahrer den Fuß vom Gaspedal genommen und schnellstmöglich eine Bremsung eingeleitet. Um die Reaktion zu messen, wurde die Verzögerung der Referenzsensorik genutzt. Der Zeitraum zwischen Warnung

<sup>99</sup> Als Referenzsensorik wurde zur Messung eine RT 3003 von Oxford Technical verwendet. Dieser Sensor verbindet differenzielles GPS/GLOSNASS mit einer Inertialsensorik zur Beschleunigungsmessung. Die Genauigkeit der Positions-Referenzmessung wird dafür vom Hersteller mit 20 mm angegeben.

und Erreichen einer Verzögerung von -2 m/s wird als Reaktionszeit<sup>100</sup> in Abbildung 2.15b angegeben und beträgt  $\bar{\varnothing}(0,34 \pm 0,06)$  s. Die resultierenden Bremsdrücke oder Trefferlagen konnten nicht gemessen werden. Nur in einem Versuch konnte die Kollision vermieden werden. Die Messwerte der ersten beiden Versuche sind vermutlich fehlerhaft und daher etwas zu gering.

Bei den gemessenen Warnzeitpunkten konnte selbst ein aufmerksamer Fahrer die Kollisionen nicht vermeiden.<sup>101</sup> Die resultierende Trefferlage und der Systemnutzen sind damit abhängig von einer Reaktion des Fahrers. In normalen Situationen erscheint eine Plausibilisierung der Verkehrssituation durch den Fahrer für die umgesetzten Warnzeitpunkte unrealistisch. Zusätzlich ist der Öffnungswinkel der verwendeten Sensorik für den Querverkehr sehr klein und schränkt das Wirkfeld damit erheblich ein. Nach Schopper & Missel (2014) ist neben dem geringen Öffnungswinkel insbesondere die Unsicherheit bezüglich der Handlung des Zielobjekts maßgeblich für die Begrenzung des Auslösezeitpunkts. Eine Betrachtung der resultierenden Trefferlage, wie sie diese Arbeit vorschlägt, findet durch das Daimler System offenbar nicht statt.

## 2.6 Zusammenfassung

Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Umfeldwahrnehmung sind heute für praktisch alle Fahrzeugsegmente verfügbar. Neue Funktionen werden zunächst in der Oberklasse eingeführt. In der nächsten Generation stehen diese dann zumeist in den restlichen Fahrzeugsegmenten zur Verfügung. Kreuzungsassistenzsysteme sind nach Jahren der Forschung in erster Gene-

---

<sup>100</sup> Als „Reaktionszeit“ ist in dieser Arbeit die Zeitdauer zwischen Auftreten des akustischen Signals und dem Erreichen einer messbaren Fahrzeugverzögerung gemeint. Damit enthält diese Definition die Reaktionszeit im biologischen Sinne (reaction time) und im technischen Sinne (response time). Sie ist eine Summation der Fahrerreaktionszeit, Fußumsetzzeit, Ansprechzeit der Bremse und einer Funktion des Fahrwerks. Für eine genaue Definition von Gefahrenerkennung über die Reaktion des Fahrers bis zum Stillstand des Fahrzeugs vergleiche Bürger et al. (1998, Kapitel 2 Abschnitt A.). Dort findet sich auch eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Definitionen (Bürger et al. 1998)[Kapitel 2 Abschnitt II.E 1)].

<sup>101</sup> Durch Erhöhung der Warnzeitpunkte auf ca. 1,4 s konnte ein entsprechend vorgespannter Fahrer die Kollisionen zuverlässig vermeiden.

ration heute in Serienfahrzeugen verfügbar. Der Umfang dieser Funktionen ist im Hinblick auf das theoretisch Mögliche noch beschränkt. Die Handlungskonzepte der Funktionen übernehmen bislang das Verhalten aus dem Längsverkehr. Gleichzeitig wird es zunehmend wichtig die einzelnen Funktionen zu einem sinnvollen Ganzen zu ordnen. Sonst besteht die Gefahr, dass sich zukünftig Funktionen überlagern und gegenseitig beeinflussen.

In stärkerem Maße als im Längsverkehr, spielt der Handlungsraum des gestoßenen Fahrzeugs eine Rolle für die Trefferlage und die resultierende Verletzungsschwere. Neben den notwendigen Arbeiten zur Erkennung und Interpretation einer Verkehrsszene fehlt eine separate Betrachtung der Handlungskonzepte im Querverkehr. Insbesondere eine genaue Erkennung der Trefferlage und Art der Unfallgegner zur besseren Prädiktion der Verletzungsschwere erscheint vorteilhaft. Zugleich gehen viele Arbeiten von gut strukturierten Verkehrsdomänen mit verbindlichen Verkehrsregeln aus. Ein weiteres Ziel muss daher in der Entwicklung entsprechend allgemeiner und adaptiver Verkehrsdomänenmodelle liegen, die es erlauben über Ländergrenzen hinweg ein deterministisches und vom Kunden akzeptiertes Systemverhalten zu liefern. Sobald sich Funktionen zur Beeinflussung von Querverkehrsunfällen zunehmend im Markt etablieren, hat dies wiederum Auswirkungen auf zukünftige Handlungskonzepte bzw. auf die getroffenen Annahmen über das zu erwartende Verhalten.

Aufgrund der impliziten Trefferlagenänderungen im Querverkehr müssen die bisherigen Ansätze zur Unfallfolgenminderung aus dem Längsverkehr auf ihre Gültigkeit überprüft werden. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur differenzierten Betrachtung der Handlungen im Querverkehr. Dabei stehen die Betrachtung der Trefferlage und der Trefferlagenänderung im Mittelpunkt der Überlegungen. Das Ziel ist es, Anforderungen für eine konsistente Funktionsdefinition zu entwickeln, die eine explizite Trefferlagenänderung erlauben und diese im Hinblick auf eine mögliche Serienentwicklung abzusichern.

## **Teil II**

### **Ein Handlungskonzept zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr**



# Kapitel 3

## Randbedingungen und Anforderungen

Das Ziel der Entwicklung eines Assistenzsystems zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr ist es die Verletzungswahrscheinlichkeit und -schwere für alle am Unfall Beteiligten zu verringern. Dafür wird in Abschnitt 3.1 eine Verletzungsrisikofunktion für die Insassen des gestoßenen Fahrzeugs hergeleitet. Diese beschreibt detailliert den Zusammenhang zwischen Trefferlage und Verletzungsrisiko und stellt damit die Grundlage für das später zu entwickelnde Handlungskonzept dar.

Den Nutzen eines Systems bzw. seine Auswirkungen aufzuweisen ist aufgrund der Vielzahl möglicher Verkehrssituationen, bei denen es zum Einsatz kommt, nur unter bestimmten Annahmen möglich. Für Fahrerassistenzsysteme zur Optimierung der Pre-Crash Phase kann eine Angabe entweder indirekt statistisch nachgewiesen oder an konkreten Einzelfällen bemessen werden. Nur durch Abstraktion und Zusammenfassung aller denkbaren Situationen ist es möglich ein Handlungskonzept zu definieren, das diese adressiert und einen Nutzen generiert.

Durch diese Verallgemeinerung lassen sich situativ schwankende Unfallkenngrößen und -konstellationen auf eine maschinell zu bestimmende Größe reduzieren. Erleichterungen bei der Systembeschreibung werden folglich mit einem Präzisionsverlust bei der Anwendung auf konkrete Situationen erkauft. Selbstverständlich muss die Form der Beschreibung zu den vorhandenen Möglichkeiten der maschinellen Wahrnehmung des Umfeldes passen.

Um den Nutzen abzuschätzen, bietet es sich daher an, zunächst eine entsprechend grobe Abstraktion aller vom System adressierten Verkehrssituationen zu betrachten. Diese als **Wirkfeld** bezeichnete Menge beschreibt idealisiert die maximale Effektivität eines optimalen Systems und damit alle Fälle, in denen das System einen Nutzen bringen könnte. Es ist unabhängig von der Leistung der verwendeten Sensorik und Aktorik. Das Wirkfeld im Querverkehr wird in Abschnitt 3.2 hergeleitet. Einschränkungen durch die maschinell wahrnehmbaren und interpretierbaren Situationen, durch die Aktorik des Fahrzeugs sowie die zugrundeliegende Fahrphysik, grenzen bei der Umsetzung das Wirkfeld ein.

Neben den technischen Randbedingungen und funktionalen Anforderungen begrenzen die nichtfunktionalen Anforderungen das Wirkfeld. Bei den nichtfunktionalen Anforderungen kommt dem Fahrzeugführer und damit der Mensch-Maschine-Schnittstelle eine entscheidende Rolle zu. Ein System muss einerseits für einen hohen Nutzen in Gefahrensituationen abgestimmt sein, andererseits aber vom Kunden akzeptiert und nicht deaktiviert werden (Maurer 2012b, Abschnitt 4.3).

Zur Erreichung eines möglichst hohen Potenzials für Pre-Crash Systeme ist insbesondere eine frühzeitige Auslösung entscheidend. Je früher diese erfolgt, desto höher ist jedoch die Unsicherheit bezüglich der sich entwickelnden Gefahrensituation. Durch Fehlinterpretation bzw. einen vom System nicht antizipierten Eingriff des Fahrzeugführers kommt es daher leichter zu einer Fehlalarmlösung, je früher ein System eingreift. Dieses als „Warndilemma der Fahrerassistenz“<sup>1</sup> bezeichnete Problem führt in der Praxis oftmals zu einer konservativeren Auslegung mit dem Ziel eine hohe Akzeptanz beim Fahrzeugführer zu erreichen.<sup>2</sup> Dabei wird das Potenzial weiter eingeschränkt, um Missbrauch<sup>3</sup> vorzubeugen und Risiken<sup>4</sup> durch Fehlalarmlösungen zu minimie-

---

<sup>1</sup> Vergleiche Maurer (2012b, Abschnitt 4.2).

<sup>2</sup> Vergleiche Meitinger (2008, Abschnitt 2.2.2.3).

<sup>3</sup> Vergleiche Meitinger (2008, Abschnitt 2.2.2.2).

<sup>4</sup> Färber & Maurer (2005) untersuchen die Auswirkungen einer plötzlichen Fehlalarmlösung der automatischen Notbremsung bei Kolonnenfahrt im Längsverkehr. Als Maßstab verwenden sie eine Kollisionswahrscheinlichkeit mit nachfolgendem Verkehr. Sie geben eine Auslegungsempfehlung von maximal 300 ms Eingriffsdauer bis 120 km/h. Studien zur Gefährdung bei Eingriffen im Querverkehr liegen nach Kenntnis des Autors bisher nicht vor.



ren. Die Potenzialabschätzung in Abschnitt 3.3 diskutiert die Auswirkungen auf das Wirkfeld und damit die **erreichbare Effizienz** des Systems. Für das in Kapitel 4 vorgestellte Handlungskonzept wird die **resultierende Effizienz** abschließend in Kapitel 6 berechnet.

In Abschnitt 3.5 werden die einzuhaltenden rechtlichen Rahmenbedingungen, insbesondere im Sinne der Produktsicherheit und -haftung, diskutiert. Eine ethische Betrachtung des entwickelten Systems, wie sie beispielsweise Homann (2005) für Fahrerassistenzsysteme allgemein beschreibt, ist wichtig zum Erreichen einer moralisch allgemein akzeptierten Grundlage und Ausgangspunkt für die Gestaltung zukünftiger Normen und Gesetze. Mögliche ethische Fragestellungen werden für die Trefferlagenänderung im Querverkehr in Abschnitt 3.6 diskutiert.

## 3.1 Verletzungswahrscheinlichkeit im Querverkehr

Die Auswirkungen von Querverkehrskollisionen sind grundsätzlich zwischen stoßendem und gestoßenem Fahrzeug zu unterscheiden. Die Stoßrichtung des stoßenden Fahrzeugs ist mit der einer Frontalkollision gegen eine Barriere vergleichbar. Vereinfachend kann angenommen werden, dass die Maßnahmen der passiven Sicherheit für das stoßende Fahrzeug auf diese Art von Kollision optimiert abgestimmt sind. Die Insassen werden dabei durch den größten im Fahrzeug vorhandenen Deformationsweg sowie durch die auf Längsverkehrskollisionen optimierte Selbst- und Partnerschutz Auslegung geschützt. Die Verletzungswahrscheinlichkeit wird daher wesentlich durch die Kollisionsgeschwindigkeit  $v_{Kol}$ , die Geschwindigkeitsänderung des stoßenden Fahrzeugs in der Kollision  $\Delta v$  und das Masseverhältnis der beiden Fahrzeuge bestimmt.

Die Verletzungswahrscheinlichkeit im gestoßenen Fahrzeug muss genauer differenziert werden. Neben der oben erwähnten Kollisionsgeschwindigkeit und dem Masseverhältnis der beiden Fahrzeuge spielen die Trefferlage der beiden Fahrzeuge und die Sitzposition der Insassen eine wichtige Rolle. Die Auswirkungen während der Kollision unterscheiden sich außerdem zwischen der dem Stoß zugewandten und der dem Stoß abgewandten Seite, durch die

unterschiedlichen Möglichkeiten zur Interaktion mit dem Innenraum und weiteren Insassen (Frampton et al. 1998) und (Fildes & Digges 2010, Abschnitt 2.3.3). Da diese Auswirkungen sowohl crash- wie auch fahrzeugindividuell untersucht werden müssen, liegt im Folgenden der Fokus auf den Insassen mit dem Worst-Case der beiden Fälle, der stoßzugewandten Seite (Fildes & Digges 2010, Abschnitt 2.4). Die Insassen dieser Seite sind bedingt durch die Deformation und der damit verbundenen Intrusion einem größeren Verletzungsrisiko ausgesetzt.<sup>5</sup> Insassen auf der stoßabgewandten Seite erleiden insbesondere Kopf- und Thoraxverletzungen, die in Fahrzeugen mit Kopfairbags reduziert werden können (Griffin et al. 2012).<sup>6</sup>

#### **3.1.1 Grundlagen des Verletzungsrisikos**

Verletzungen der Insassen entstehen im Crash durch eine stumpfe Krafteinwirkung auf die Insassen. Dabei sind im Seitencrash zum einen die Auswirkungen durch Kontakt der Insassen mit den Strukturen im Innenraum<sup>7</sup>, einschließlich der Rückhaltesysteme, und zum anderen die Auswirkungen der Rotationskräfte bestimmend für die Verletzungen. Die dabei entstehenden AIS 2 Verletzungen treten dabei gehäuft an den oberen Extremitäten,

---

<sup>5</sup>Gabler et al. (2005) geben an, dass nur 43% der schwerverletzten und 24% der getöteten Insassen auf der stoßabgewandten Seite sitzen. Relevant ist dabei immer, auf welchen Bezugspunkt sich die jeweiligen Studien stützen (z.B. alle Unfälle oder nur MAIS 3+), wie der seitliche Anstoß definiert wird (z.B. nur 90° oder auch größere Winkel) und wie die technische Unfallschwere beschrieben wird (z.B. Gesamtgeschwindigkeitsänderung oder nur der laterale Anteil) (Gabler et al. 2005). Vergleiche auch Otte et al. (1984), Harms et al. (1987), Farmer et al. (1997) und Fildes & Digges (2010, Abschnitt 2).

<sup>6</sup>Insbesondere durch die zunehmend steiferen Fahrgastzellen kommt es zu einem erhöhten Anteil schwerer Kopf- und Thorax-Verletzungen an der Gesamtverletzung bei Fahrzeugen ohne Curtain-Airbags. Es ist weiterhin anzunehmen, dass „die steife Fahrgastzelle einige der mittelschweren Verletzungen in leichte überführt und es so zu einer Überrepräsentanz der schweren Verletzungen kommt“. Daher bestimmt im Seitencrash die Interaktion mit der jeweils am nächsten liegenden Fahrzeugseite bzw. Tür die Unfallschwere und nicht so sehr die Interaktion mit anderen Insassen oder anderen Strukturen. Gegenübergestellt wurden Unfälle mit Verletzungen ISSx > 2,5 in gestoßenen Fahrzeugen mit Baujahr vor 1997 bzw. nach 1997 anhand eines aktuellen GIDAS Auszugs von 2013. Vergleiche auch Gabler et al. (2005), Sahraeia et al. (2014) sowie die Einschränkungen aus Fußnote 5.

<sup>7</sup>Vor allem durch Kontakt mit der Tür bzw. der Türverkleidung (Hassan et al. 1995; Pipkorn 1996).

Thorax, Kopf/Gesicht und im Beckenbereich auf (in absteigender Reihenfolge). Bei AIS 3+ Verletzungen gibt es eine Verschiebung zu Thorax, Kopf/Gesicht, Abdomen (in absteigender Reihenfolge).<sup>8</sup> Die Verletzungsschwere hängt wesentlich von der auf die Insassen wirkenden linearen (Gefäße, insbesondere Aorta, Gehirn) und rotatorischen (Gehirn) Beschleunigung ab, sowie vom Kontakt mit festen externen Gegenständen (Kopf) beispielsweise anderen Fahrzeugfronten, oder vom Kontakt mit Strukturen des eigenen Fahrzeugs (Kopf, Thorax, Becken) begünstigt durch die Intrusion (Hassan et al. 1995). Die Verletzungsschwere kann als Proxyvariable über die Geschwindigkeitsänderung des stoßenden Fahrzeugs in der Kollision beschrieben werden (Pipkorn 1996; O'Brien 2010).

Zur Risikobewertung stellt Kullgren (1998, Seite 16) den Zusammenhang zwischen der technischen Unfallschwere und den medizinischen Auswirkungen über eine Dosis-Wirkungs-Kurve her.<sup>9</sup> Die auf die Insassen wirkende Dosis setzt er gleich mit der auf das Fahrzeug wirkenden Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  des stoßenden Fahrzeugs oder der durchschnittlichen Beschleunigung im Stoß. Tingvall et al. (2003) verfeinern diese Modelle, indem sie die Gewichtsverhältnisse zwischen den beiden Fahrzeugen berücksichtigen.<sup>10</sup> Zusätzlich trennt er die stoßabgewandte von der stoßzugewandten Seite und berücksichtigt verschiedene Verkehrsdomänen, die er aufgrund der zulässigen Höchstgeschwindigkeit unterscheidet. Die Ergebnisse lassen aufgrund der Methodik nur einen qualitativen Vergleich zu. Dabei steigt das Risiko exponentiell mit ansteigendem  $\Delta v$ . Zudem ist die stoßzugewandte Seite einem höheren Risiko ausgesetzt. Genauer wird diese Beschreibung, wenn man als Proxyvariable einen Tupel aus Geschwindigkeitsänderung und Trefferlage berücksichtigt.

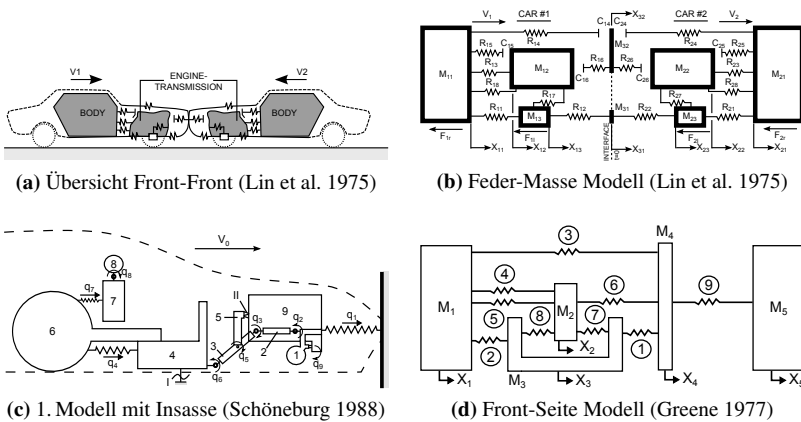
Deutlich wird der Einfluss der Trefferlage, wenn man zur Beschreibung ein vereinfachtes Mehrkörperstrukturmodell der Fahrzeuge und Insassen verwendet. Lin et al. (1975) schlagen ein solches System für Kollisionen im Längsverkehr vor, bei dem die für den Crash relevanten Massen (restliches Fahrzeug, Motor/Getriebe, Fahrwerk) und die restlichen Bauteile als

---

<sup>8</sup>Vergleiche beispielsweise Franz et al. (1994) und Hassan et al. (1995).

<sup>9</sup>Vergleiche auch Kullgren (2008).

<sup>10</sup>Vergleiche beispielsweise Evans (1994) und O'Brien (2010) zu den Einflüssen des Massenverhältnisses.



**Abbildung 3.1:** Mehrkörperstrukturmodelle zur Beschreibung von Fahrzeugkollisionen. Vergleiche Anhang Abschnitt A.3 für eine vergrößerte Darstellung inklusive Bezeichnungen der Modellelemente. Modelliert wird nur die plastische Verformung (keine Speicher für elastischen Anteil).

Verformungselemente (Stoßfänger, Kühler, Längsträger, Anbauteile, Stirnwand usw.)<sup>11</sup> bzw. Freiwege modelliert werden (Abbildung 3.1a und Abbildung 3.1b). Schöneburg (1988, Kapitel 4.8.3.1) erweitert das Modell für den Längsverkehr, indem er erstmalig zusätzlich die Insassen als zwei Massen (Kopf, restlicher Körper) über ein Verformungselement (Rückhaltesystem) an die Fahrzeugmasse ankoppelt (Abbildung 3.1c). Greene (1977) erweitert dieses Modell für den Seitencrash, indem er das gestoßene Fahrzeug als ein Verformungselement (Türstruktur) und eine feste Masse annimmt (Abbildung 3.1d). Als Berührungspunkt zwischen den Fahrzeugen dient immer eine als infinitesimal dünn angenommene Kontaktfläche, die als Interface bezeichnet wird. Für die Insassen ist dabei relevant, wieviel Energie bei der ersten Kompression durch die Verformungselemente aufgenommen werden

<sup>11</sup>Die Verformungselemente können dabei beliebig komplex modelliert werden, beispielsweise un-/elastisch, nicht-/linear oder mit einer eigenen Kennlinie (Kamal & Lin 1982).

kann, da dies einer plastischen Verformung (Intrusion) der Fahrgastzelle entgegenwirkt und die auftretenden Beschleunigungen dämpft.<sup>12</sup>

Abbildung 3.2 zeigt ein für den Stoßenden vereinfachtes und für den Gestoßenen erweitertes Modell einschließlich der Insassen. Als Verformungselemente dargestellt sind die für die Kraftübertragung wesentlichen Strukturen der beiden Fahrzeuge. Das stoßende Fahrzeug leitet dabei seine Kräfte über die Längsträger und den Motor ein. Diese werden je nach Trefferlage auf unterschiedliche Verformungselemente des gestoßenen Fahrzeugs verteilt und wirken damit auf die Insassen bzw. stützen sich über die Achsen/Räder ab. Für die Insassen des stoßenden Fahrzeugs ist die Trefferlage damit nur bei einem hohen Ungleichgewicht der Verformungssteifigkeit und Fahrzeugmasse zu Lasten des stoßenden Fahrzeugs von Bedeutung. Für das gestoßene Fahrzeug ergibt sich damit ein Auslegungskonflikt zwischen Steifigkeit zur Vermeidung von Intrusion und Energiedissipation, zur Dämpfung der Beschleunigungen bei gleichzeitiger optimaler Verteilung auf die gesamte Fahrzeugflanke bzw. auf ein zu erwartendes stoßendes Interface.

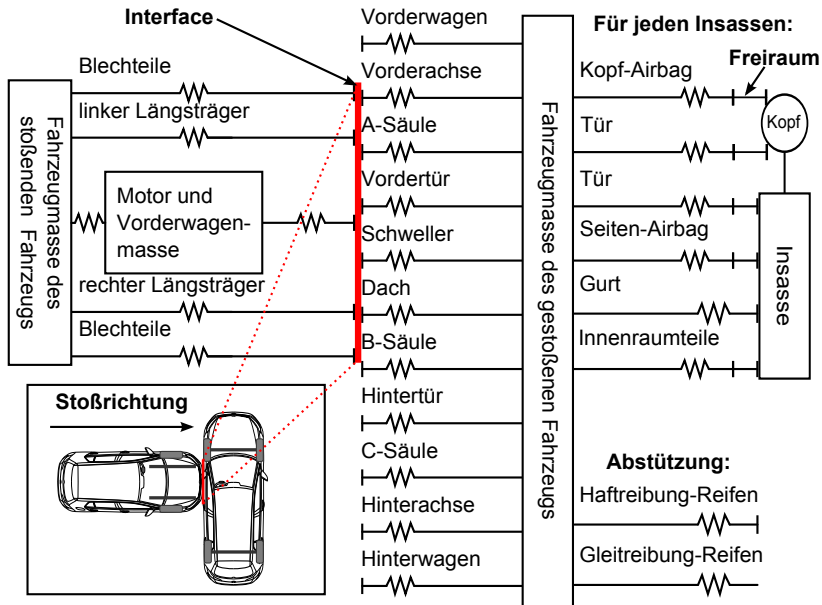
Die Quantifizierung der Einflüsse einer Intrusion auf der stoßzugewandten Seite wird stark durch die Fahrzeugkonstruktion und die vorhandenen passiven Sicherheitsmaßnahmen beeinflusst. Dabei ist neben der allgemeinen Verbesserung der passiven Sicherheit, beispielsweise steiferer Fahrgastzellen, Seitenaufprallschutz, Seitenairbags<sup>14</sup>, insbesondere durch die Einführung

---

<sup>12</sup>Je nach Richtung der Krafteinwirkung auf den Insassen kann dabei auch ein degressiver Verlauf vorteilhaft sein. Degressive Kennungen im Vorderwagen erlauben beispielsweise eine schnellere Ankopplung des Fahrzeugs an die gegnerische Fahrzeugstruktur, um möglichst viel Energie abzubauen, bevor die Insassen über die Rückhaltesysteme an das eigene Fahrzeug angekoppelt werden. Vergleiche auch Kurz (2010).

<sup>13</sup>Kompatibilität ist die Optimierung des Fahrzeugdesigns mit dem Ziel die Anzahl der Verletzungen und tödlichen Unfallfolgen für alle Kollisionen, die im tatsächlichen Unfallgeschehen vorkommen, zu minimieren (O'Brien 2010, Kapitel 6.1). In Bezug zum Interface bedeutet dies eine möglichst große und richtig positionierte Fläche zur Krafteinleitung in die energieabsorbierenden Strukturen zu nutzen.

<sup>14</sup>Für Seitenairbags konnte bisher kein statistisch signifikanter Nutzen bei der Feldeffektivität nachgewiesen werden. Obwohl ein Nutzen intuitiv naheliegt, können McGwin, Jr. et al. (2003b) und McGwin, Jr. et al. (2004) keinen Feldnutzen nachweisen. Griffin et al. (2012) untersuchen den Nutzen später, zu einem Zeitpunkt höherer Marktdurchdringung, und können weiterhin keinen signifikanten Nutzen nachweisen. Vielmehr weisen sie auf ein mögliches



**Abbildung 3.2:** Qualitatives Mehrkörperstrukturmodell zur Beschreibung von Querverkehrskollisionen. Entsprechend der Trefferlage wird nur an einem Teil des gestoßenen Fahrzeugs Kraft übertragen (verschiebbares Interface). Die Insassen koppeln mit variablen Freiwegen an die Rückhaltesysteme des Fahrzeugs an. Das Fahrzeug stützt sich zunächst über die Haftreibung und danach über die Gleitreibung ins Unendliche ab. Das stoßende Fahrzeug ist stark vereinfacht dargestellt, um insbesondere die schmalflächige Kraftübertragung an den Längsträgern zu betonen. Vergleiche Kamal & Lin (1982) für eine detaillierte Beschreibung der Modelle und Kreuzinger (2005) bzw. O'Brien (2010, Kapitel 9) für eine detaillierte Beschreibung der Kompatibilität<sup>13</sup> und Kraftverteilung am Interface.

von Kopf-Airbags eine entscheidende Veränderung für die Verletzungswahrscheinlichkeit des Unfallgeschehens eingetreten.<sup>15</sup>

#### **Angabe der Trefferlage**

Die Systematik zur Angabe der Trefferlage ist in Abbildung 3.3 beispielhaft dargestellt. Dabei wird vereinfachend als Worst-Case<sup>16</sup> angenommen, dass beide Fahrzeuge beim Kreuzungsunfall orthogonal zueinander stehen.<sup>17</sup> Als Bezugspunkt<sup>18</sup> dient die Mitte des stoßenden Fahrzeugs. Da die Kollisionen aus der Sichtweise des Stoßenden betrachtet werden, ist die Angabe mit dem ersten Punkt, an dem eine Kollision erfolgt, als 0 % gleichzusetzen. Bei 100 % ist dementsprechend der letzte Punkt erreicht, an dem beide Fahrzeuge sich noch berühren. Zusätzlich sind 13 Fälle für die Bewertung des Verletzungsrisikos angegeben. Diese sind in der Realität abhängig von den Abmessungen

---

zusätzliches Verletzungsrisiko durch die sehr körpernahe Airbagentfaltung für ältere Insassen hin.

<sup>15</sup>Griffin et al. (2012) geben für AIS2+ Kopfverletzungen ein 30 % niedrigeres Risiko bei vorhandenen Kopf-Airbags als Feldeffektivität zwischen 2000 und 2009 in der amerikanischen „National Automotive Sampling System-Crashworthiness Data System“-Datenbank (NASS-CDS) an.

<sup>16</sup>Augenstein et al. (2000a) untersuchen den Einfluss der Winkel auf die Unfallschwere und stellen für die stoßzugewandte Seite fest, dass Winkel zwischen 60° und 90° für die Insassen den Worst-Case darstellen. Augenstein et al. (2000b) bestätigen diese Annahme für die stoßabgewandte Seite und Fildes & Digges (2010, Abschnitt 2.3.2) für beide Seiten. Vergleiche die weiteren Einschränkungen aus Fußnote 5.

<sup>17</sup>Bei flacheren Winkeln kommt es zu einem Abgleiten. Grundsätzlich nimmt  $\Delta v$  für diese exzentrischen Stöße bei steigendem  $v_{Kol}$  ab. EES wird als Expertenrechnung mit Hintergrundwissen (über die Fahrzeuge) über die Deformation ausgerechnet und bleibt auch bei langen Gleitstößen konstant. Für die später bevorzugten Trefferlagen wird angenommen, dass jedes gestoßene Fahrzeug an den Achsen gleich steif bzw. maximal steif ist. Aus den für das eigene Fahrzeug bekannten Daten könnte auch die EES ausgerechnet werden, was im orthogonalen Stoß für die Systemauslegung allerdings keinen wesentlichen Vorteil bringt und im exzentrischen Stoß, aufgrund der fehlenden Information über das gestoßene Fahrzeug, zu ungenau ist. Zurzeit entsteht eine weiterführende Arbeit, die den Einfluss der Winkel genauer untersucht. Für diese Arbeit werden im Folgenden alle Beispiele und Effektivitätsberechnungen für orthogonale oder vernachlässigbare Abweichungen dieses Winkels angegeben.

<sup>18</sup>Der Ergebnisteil Kapitel 5 verwendet eine davon abweichende Notation. Der Unterschied besteht bei der Festlegung des Bezugspunktes, der an den linken Rand des Fahrzeugs wandert und in Metern angegeben ist. Die entsprechende Notation wird in Kapitel 5 vor Benutzung eingeführt.

der jeweiligen Fahrzeuge, da sie Punkte markieren, bei denen bzw. ab denen es zu einer bestimmten Form von Interaktion zwischen den Bauteilen der Fahrzeuge kommt bzw. eine solche aufhört. Die dafür relevanten Bauteile sind: die Räder bzw. Achsen, die Fahrgastzelle, die jeweiligen Sitze sowie die B- und C-Säule des gestoßenen Fahrzeugs.

#### **Medizinische Auswirkungen**

Eine genaue Beschreibung der Mechanik der Kollision im Seitencrash und der zugrundeliegenden Modelle und Energieumsetzung findet sich in der Literatur und ist beispielsweise in Schaper (2012) beschrieben. Für die medizinische Auswirkungen sind die Linear- und Rotationsbeschleunigung sowie die verursachte Intrusion am gestoßenen Fahrzeug zu betrachten.<sup>19</sup>

Art und Höhe dieser drei Faktoren hängen wie bereits erwähnt von einer Vielzahl von Faktoren ab und sind prinzipiell für jeden Unfall individuell. Da diese Parameter nur teilweise vor dem Crash mit der vorhandenen Sensorik bestimmt werden können, wird im Folgenden dieser Einfluss über das  $\Delta v$  des stoßenden Fahrzeugs und die Trefferlage abgeschätzt. Eine geeignete Vereinfachung zur Bewertung ist die zunächst getrennte Bewertung von Intrusion und Rotationsbeschleunigung in grundsätzlicher Abhängigkeit der Trefferlage.

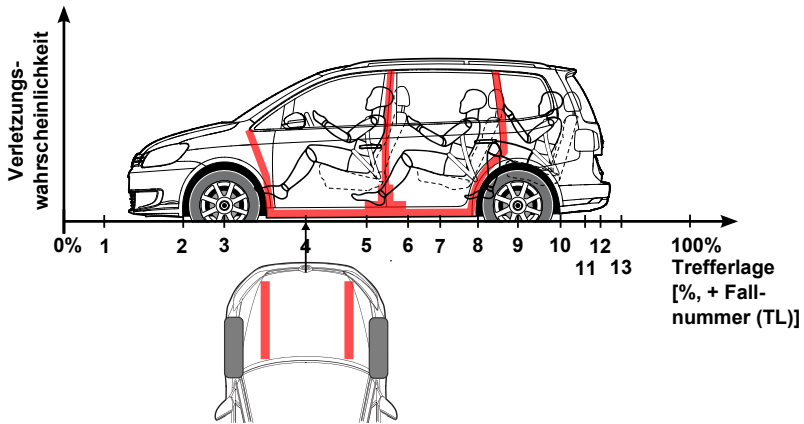
Die Annahmen zur Intrusion ergeben sich dabei aus dem eingeführten Strukturmodell über das Interface. Für das stoßende Fahrzeug sind die Positionen und Eigenschaften der interagierenden Elemente bekannt. Dadurch ergibt sich ein Interface, das auf dem gegnerischen Fahrzeug positioniert wird. Die Position der Strukturelemente am gegnerischen Fahrzeug, beispielsweise der Achsen, kann über maschinelle Umfeldwahrnehmung oder C2C Kommunikation erfasst werden.

Dadurch variiert die Intrusion über den Verlauf der Trefferlage. Eine konturbasierte Risikofunktion, die die Strukturen der beiden Fahrzeuge genauer in Betracht zieht, soll in Niebuhr et al. (in Bearbeitung) vorgestellt werden. Vereinfachend wird das Risiko in dieser Arbeit für eine Verletzung durch eine Expertenschätzung in Tabelle 3.1 für jede Sitzreihe angegeben. Das Risiko

---

<sup>19</sup>Vergleiche Stemper & Pintar (2014) zu Verletzungen des Gehirns insbesondere bei gleichzeitig auftretenden Linear- und Rotationsbeschleunigungen.

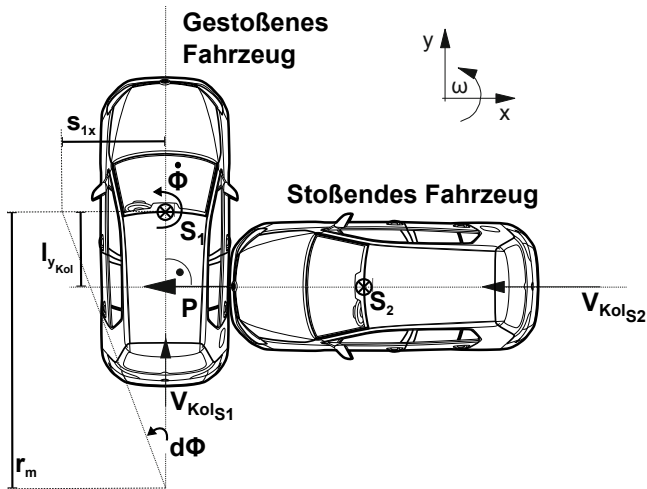




**Abbildung 3.3:** Systematik zur Darstellung der Trefferlage aus Sicht des stoßenden Fahrzeugs. Die Angabe erfolgt von 0% (vorderster Punkt) bis 100% (hinterster Punkt). Die 13 für das Verletzungsrisiko relevanten Trefferlagen sind als Fallnummern zur besseren Übersicht extra angegeben und werden im Folgenden als TL abgekürzt. Farblich hervorgehoben sind die für den Seitencrash relevanten steifen Strukturen bei stoßendem und gestoßenem Fahrzeug. Dargestellt ist die Trefferlage TL 4. Die weiteren Fälle sind:

Fallnummer (TL)	Beschreibung
1	Rechter Längsträger trifft Vorderwagen
2	Rechter Längsträger trifft Vorderachse
3	Fahrzeug-Mitte trifft Vorderachse
4	Rechter Längsträger trifft 1. Sitzreihe
5	Fahrzeug-Mitte trifft B-Säule
6	Rechter Längsträger trifft 2. Sitzreihe
7	Linker Längsträger trifft B-Säule, rechter Längsträger trifft C-Säule
8	Rechter Längsträger trifft Hinterachse und 3. Sitzreihe
9	Fahrzeug-Mitte trifft Hinterachse
10	Linker Längsträger trifft Hinterachse
11	Linker Längsträger trifft Kofferraum
12	Linker Längsträger trifft 3. Sitzreihe
13	Linker Längsträger trifft hinteren Querträger

ist dabei Trefferlagen zentriert angegeben. Es ist daher von der prinzipiellen Bauart (5-Türer oder 3-Türer) des Fahrzeugs unabhängig.



**Abbildung 3.4:** Grundlegende Berechnung wirkender Kräfte bei der Querverkehrskollision nach Johannsen (2013, Abschnitt 4.7.3)

Die Annahmen zur Beschleunigung erfolgen unter Berücksichtigung des Momentengleichgewichts um den Schwerpunkt des gestoßenen Fahrzeugs.<sup>20</sup> Vereinfachend wird für die folgenden Berechnungen von einem stehenden Fahrzeug, das im  $90^\circ$  Winkel getroffen wird, ausgegangen. In der Realität müssen eine Reihe von Effekten<sup>21</sup> berücksichtigt werden. Diese lassen sich dann nicht mehr ohne Weiteres analytisch lösen, sondern nur noch simulativ berechnen. Durch die hier getroffenen Annahmen kann mit den Hypothesen von Marquard gerechnet werden, in der der Stoßantrieb nur in Fahrtrichtung des stoßenden Fahrzeugs wirkt und von einer unendlich kurzen Stoßzeit

<sup>20</sup>Vergleiche dazu auch Bellin (2011a) für eine erweiterte Betrachtung der Auswirkungen auf das stoßende Fahrzeug.

<sup>21</sup>Beispielsweise Gleit-, Verhakens- und Abstützeffekte.

ausgegangen wird (Marquard 1962). Die Stoßzahl<sup>22</sup> wird in Abschnitt 3.1.3 durch eine qualitativ ermittelte Referenzkurve für eine feste Geschwindigkeit über die Trefferlage angegeben.<sup>23</sup>

Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, ist damit das Verhältnis zwischen der Rotationsbeschleunigung um die Fahrzeughochachse und der (linearen) translatorischen Beschleunigung in (negativer) X-Richtung<sup>24</sup> für das gestoßene Fahrzeug abhängig von der Entfernung zum Schwerpunkt  $l_{yKol}$ . Die Rotationsgeschwindigkeit  $\dot{\phi}$  steigt dabei linear mit der Entfernung zum Schwerpunkt. Reziprok verhält sich der translatorische Versatz  $d\phi$ , der in Abbildung 3.4 durch die Entfernung des Schwerpunktes zum Momentanpol  $r_m$  beeinflusst wird und als  $s_{1x}$  angegeben ist. Die Wirkung der Rotation auf die Insassen ist darüber hinaus zusätzlich abhängig von der Sitzreihe und dem zugrundeliegenden Hebel, der die Auswirkungen entsprechend erhöht oder mindert. Eine Expertenschätzung bezüglich der Auswirkungen der Rotation ist in Tabelle 3.1 für jede Sitzreihe angegeben.

#### 3.1.2 Einfluss der Trefferlage

Der Einfluss der Trefferlage auf die Insassen hängt von der Sitzreihe ab. Um eine Risikokurve für die jeweilige Sitzreihe angeben zu können, werden zunächst die grundlegenden Einflüsse aus Rotation und Intrusion diskutiert. Anschließend werden die Kurvenverläufe in Abhängigkeit der Trefferlage für AIS-2+ und AIS-3+ Verletzungen dargestellt. Die Verläufe zwischen den Punkten sind entweder gleichbleibend als exponentielle Zu- bzw. Abnahme oder in Form einer interpolierten Kurve angegeben. Die wesentlichen Punkte im Verlauf werden einzeln diskutiert. Für einen jeweils markanten Punkt

---

<sup>22</sup>In der Realität ist die Stoßzahl abhängig vom Interface, der Kollisionsgeschwindigkeit und den jeweiligen Fahrzeugen.

<sup>23</sup>Die genauen Steifigkeiten sind jeweils ein Betriebsgeheimnis der Hersteller.

<sup>24</sup>Die Berechnungen zur Stoßmechanik erfolgen in dem in Abbildung 3.4 angegebenen globalen kartesischen Koordinatensystem. In der restlichen Arbeit zeigt die X-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems in Fahrtrichtung des stoßenden Fahrzeugs. Die Y-Achse liegt 90° in Fahrtrichtung nach links gedreht. In der Diskussion der entsprechenden Versuche ist das globale Koordinatensystem dementsprechend nachempfunden. Die X-Achse des globalen Koordinatensystems liegt dabei in Fahrtrichtung des stoßenden Fahrzeugs für einen Gierwinkel von 0°.

**Tabelle 3.1:** Bewertung der Verletzungswahrscheinlichkeit durch Rotation und Intrusion für den stoßzugewandten Insassen im gestoßenen Fahrzeug für ausgewählte Trefferlagen. Entsprechend: o niedriges Risiko, + mittleres Risiko, ++ hohes Risiko, +++ sehr hohes Risiko

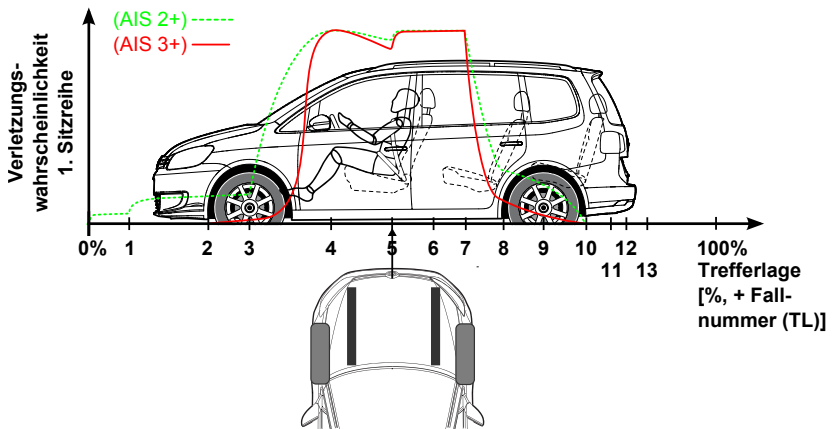
		Fallnummer (TL)							
		2	4	6	8	9	10	11	12
Intrusion	1. Sitzreihe	o	+++	+++	+	o	o	o	o
	2. Sitzreihe	o	+	+++	++	++	+	o	o
	3. Sitzreihe	o	o	o	o	+	++	+++	+++
Rotation	1. Sitzreihe	+	o	o	o	o	+	o	o
	2. Sitzreihe	o	o	o	o	+	++	++	+
	3. Sitzreihe	o	o	o	+	++	+++	++	+

ist auf der Abszisse zur Verdeutlichung ein stoßendes Fahrzeug angegeben. Abschließend erfolgt eine Gesamtdarstellung. Diese generische Risikokurve bildet die Grundlage für das vorgestellte Handlungskonzept.

**1. Sitzreihe**

Verletzungen in der 1. Sitzreihe sind stärker durch die Folgen der Intrusion als durch die der Rotation gekennzeichnet. Dies liegt zum einen an der Nähe der Sitzposition zum Fahrzeugschwerpunkt und damit zum Drehzentrum (kurzer Hebelarm), zum anderen kann der mit der Rotation assoziierte Aufprall des Kopfes wirkungsvoll durch Kopfairbags begrenzt werden. Ein exemplarischer Verlauf ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Kollisionen im Bereich des Vorderwagens (0 % bis TL 2) führen nur zu einer geringen Kraftübertragung auf das gestoßene Fahrzeug und damit zu einem Ableiten der Fahrzeuge. Das Verletzungsrisiko steigt ab TL 3 mit dem Eindringen des rechten Längsträgers in den Fahrgastraum. Ab TL 4 stützt sich auch der linke Längsträger nicht mehr auf der Vorderachse ab und der rechte

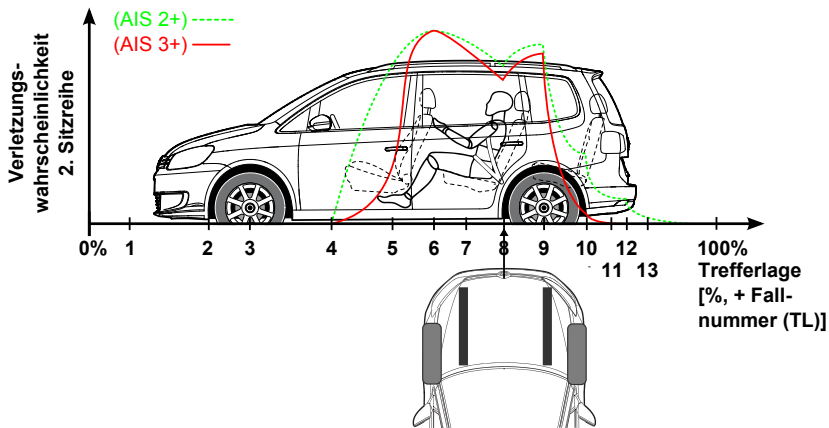


**Abbildung 3.5:** Verletzungsrisikofunktion für den stoßzugewandten Insassen der 1. Sitzreihe im gestoßenen Fahrzeug

Längsträger auf Höhe der Sitzreihe führt zu einem großen Risiko durch Intrusion. Bei dieser Trefferlage wird das gestoßene Fahrzeug auf der seitlichen Höhe seines Schwerpunkts getroffen. Bedingt durch den kürzesten Hebel, im Vergleich zu den anderen Trefferlagen, wird die meiste Energie im Stoß übertragen. Im Falle gut durch die B-Säule abgestützter Kollisionen (TL 5) sinkt das Risiko leicht. Von TL 5 bis TL 7 stützt sich das gestoßene Fahrzeug weiterhin gut über die Räder ab und der damit einhergehende Energieübertrag bleibt hoch. Der Anstieg ab TL 5 ist auf die schlechtere Front-Seiten-Kompatibilität zurückzuführen, da beide Längsträger um die B-Säule herum intruieren. Mit dem Abstützen des rechten Längsträgers auf der Hinterachse sinkt das Risiko durch Intrusion deutlich schneller, als es angestiegen ist. Durch die langsam steigenden Risiken durch Rotation bleibt der AIS-2+ Verlauf auf einem höheren Niveau bis TL 10, wo es zu einem Abgleiten Richtung Fahrzeugheck kommt. Die im Hinterwagen stattfindende Intrusion stellt dabei kein besonderes Risiko für die 1. Sitzreihe dar.

## 2. Sitzreihe

Verletzungen in der 2. Sitzreihe sind aufgrund der Lage im Fahrzeug häufig durch die Intrusion beeinflusst. Im Gegensatz zur 1. Sitzreihe ist aufgrund der Distanz zum Fahrzeugschwerpunkt auch das Risiko für Rotationsverletzungen größer. Dabei wird die Sitzreihe nach hinten relativ wirkungsvoll durch die Hinterachse und nach vorne durch die B-Säule geschützt. Abbildung 3.6 stellt den Verlauf dar.



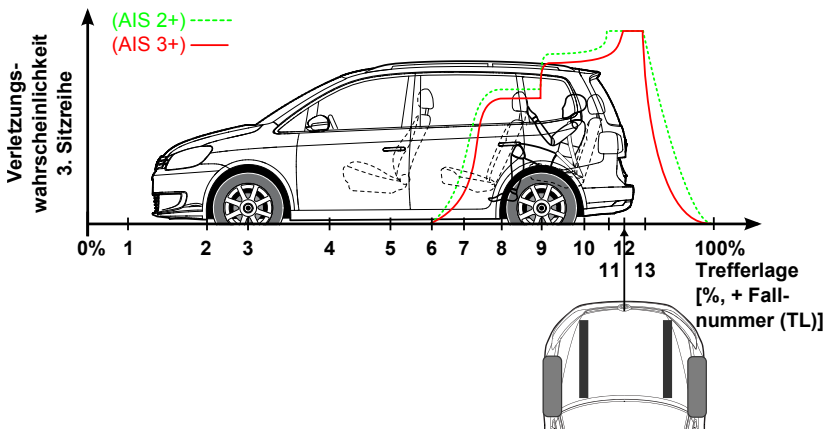
**Abbildung 3.6:** Verletzungsrisikofunktion für den stoßzugewandten Insassen der 2. Sitzreihe im gestoßenen Fahrzeug

Kollisionen im Bereich des Vorderwagens (TL 0 bis TL 4) haben nur einen geringen Einfluss auf die 2. Sitzreihe. Ab Erreichen der B-Säule (TL 4) steigt das Risiko für Verletzungen an. Sobald der rechte Längsträger in den Bereich der 2. Sitzreihe kommt (TL 5), steigt auch das AIS-3+ Risiko stark an. Das Maximum wird bei TL 6 mit dem rechten Längsträger mittig auf der Sitzreihe erreicht. Der starke Abfall bis TL 8 begründet sich anfänglich durch das bessere Abstützen des linken Längsträgers auf der B-Säule, sowie des beginnenden (ab TL 7) Abstützens des rechten Längsträgers auf der Hinterachse. Mit der verbesserten Krafteinleitung in die Hinterachse steigt die Rotation

des gestoßenen Fahrzeugs, gleichzeitig findet eine höhere Intrusion durch den linken Längsträger auf Höhe der Sitzreihe statt. Daher steigt das Verletzungsrisiko an, bis der linke Längsträger auf Höhe der Hinterachse (TL 9) die Fahrgastzelle verlässt. Die AIS-2+ Risiken fallen stufenweise mit dem zunehmend geringeren  $\Delta v$  im Heck.

### 3. Sitzreihe

Verletzungen in der 3. Sitzreihe sind maßgeblich durch die hohe Intrusion bei Aufprall im Hinterwagen beeinflusst. Zudem ist die Rotation durch den großen Hebel zum Schwerpunkt und die größte Entfernung der Insassen zum Drehzentrum besonders ungünstig für die Insassen. Weiterhin sind die Fahrzeuge in diesem Bereich nicht für den Seitencrash versteift, keine Kopfairbags vorhanden und das Risiko für die Insassen, direkt mit tragenden Karosserieteilen zusammenzustoßen, am größten. Der Verlauf des Risikos ist in Abbildung 3.7 qualitativ dargestellt.



**Abbildung 3.7:** Verletzungsrisikofunktion für den stoßzugewandten Insassen der 3. Sitzreihe im gestoßenen Fahrzeug

Kollisionen bis TL 6 gehen mit einem geringen Intrusions- und Rotationsrisiko einher. Ab TL 6 steigt das Risiko stark an und ab Erreichen der Hinterachse durch den rechten Längsträger (TL 7) kommt es zur Intrusion in Verbindung mit den oben erwähnten ungünstigen Platzverhältnissen. Gleichzeitig steigt das Risiko durch Rotation. Bis TL 9 sind die Insassen noch durch die Hinterachse geschützt. Sobald der rechte Längsträger diesen Bereich verlässt, steigt das Risiko zunächst sprunghaft an, bis auch der linke Längsträger (TL 11) sich zunehmend geringer abstützt. Das maximale Risiko wird erreicht, sobald die Hinterachse nicht mehr getroffen wird und keine steife Struktur die Insassen schützt. Der sich noch auf Höhe der 3. Sitzreihe befindliche linke Längsträger führt zu einer hohen Intrusion und gleichzeitig zu einer großen Rotation. Sobald der linke Längsträger am hinteren Querträger vorbei ist, sinkt das Risiko durch Intrusion sprunghaft und es verbleiben die Risiken durch die hohe Rotation, die kontinuierlich sinken.

#### **Gesamt**

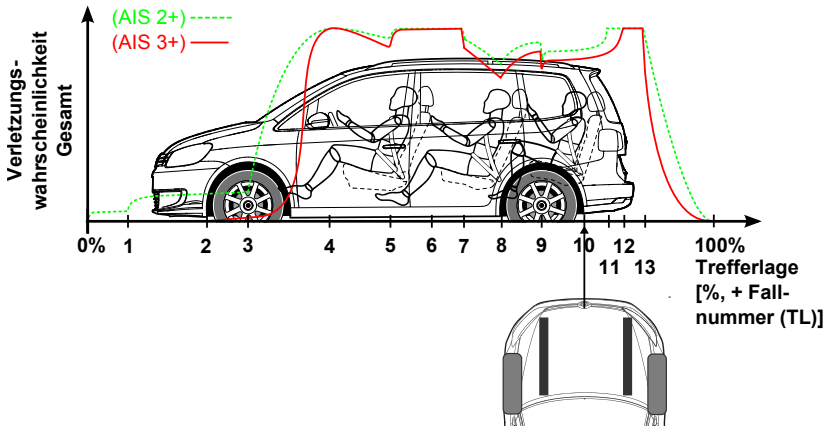
Bildet man die Vereinigung<sup>25</sup> über die drei Sitzreihen, ergibt sich zunächst ein wenig differenziertes Bild mit nur geringen Unterschieden der Risikohöhe. Abbildung 3.8 stellt das Gesamtrisiko dar. Im Bereich des Vorderwagens ist TL 2 über alle drei Sitzreihen der Punkt mit geringstem Risiko, der am nächsten an der Fahrgastzelle liegt.

Einen Punkt im Hinterwagen zu definieren, ist mit den Unsicherheiten aus dieser Expertenschätzung nicht ohne eine genaue Abwägung möglich. Grundsätzlich würden sich die TL 8+9 als lokale Minima der Gesamtfunktion anbieten. Die Gesamtfunktion ist an dieser Stelle allerdings stark vom Risiko der 3. Sitzreihe bestimmt. Bei den schon angesprochenen niedrigen Belegungsraten erscheint diese Wahl damit fragwürdig im Sinne einer Risikominimierung über alle Unfälle.

---

<sup>25</sup>Im Folgenden werden die Vereinigungen über die maximale Verletzungswahrscheinlichkeit gebildet. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil einer Worst-Case Abschätzung und wird daher als repräsentativ für die Verletzungswahrscheinlichkeit angenommen. Ein alternativer Ansatz ist beispielsweise die Bildung eines Erwartungswerts unter Berücksichtigung der statistischen Belegungsrate.

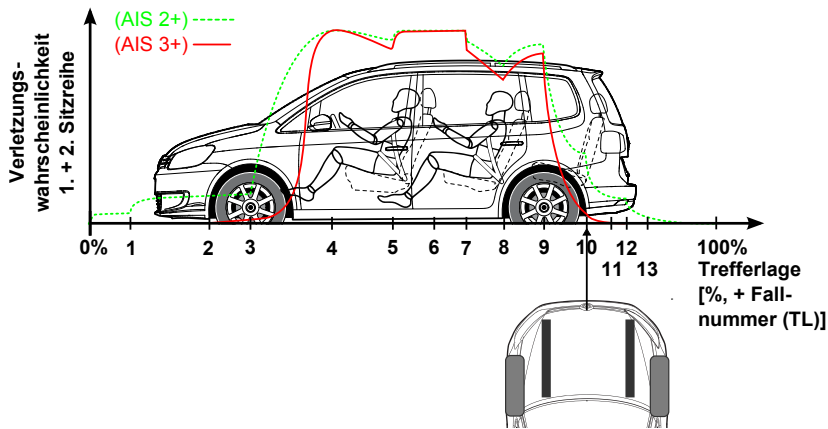




**Abbildung 3.8:** Gesamt-Verletzungsrisikofunktion für die stoßzugewandten Insassen im gestoßenen Fahrzeug bei voller Belegung

Betrachtet man nur die Risiken für die Vereinigung der ersten beiden Sitzreihen in Abbildung 3.9, gibt es mit TL 10 einen Punkt mit deutlich reduziertem Risiko im Vergleich zu TL 8+9. Dieser ist auch hinsichtlich einer weiteren Verschiebung nach hinten optimal. Für die Insassen der 3. Sitzreihe ist TL 10 noch vom Maximum entfernt, allerdings schon auf sehr hohem Niveau. Ein weiteres Verschieben der Trefferlage nach hinten würde für die 3. Sitzreihe zu einem weiteren Ansteigen des Verletzungsrisikos führen. Ein Verschieben nach vorne auf TL 9 führt für die 3. Sitzreihe nur zu einer geringen Abnahme, jedoch zu einer deutlichen Zunahme für die 2. Sitzreihe. TL 8 führt für die 3. Sitzreihe nur zu einer geringfügigen Verbesserung. Gleichzeitig führt TL 8 aber zu einer deutlichen Verschlechterung für die 1. Sitzreihe, die in jedem Fall belegt ist.

Zusammenfassend scheint es daher angebracht TL 10 als Punkt im Hinterwagen zu treffen. Da zwischen TL 2 und TL 10 das Risiko fast auf gleich hohem Niveau ist, nach hinten aber insbesondere für die 1. Sitzreihe abfällt und mit Erreichen von TL 10 auch für die 2. Sitzreihe sehr gering ist, erscheint dieser Punkt als Zieltrefferlage für ein System zur Kollisionsfolgenminderung.



**Abbildung 3.9:** Verletzungsrisikofunktion für den stoßzugewandten Insassen der 1. + 2. Sitzreihe im gestoßenen Fahrzeug

optimal. Liegt ohne Systemeingriff eine Trefferlage zwischen TL 2 und TL 9 vor, ist eine wesentliche Voraussetzung für einen Systemeingriff erfüllt. Gemeint ist die Voraussetzung, dass ein Eingriff auch im Worst-Case nicht zu einer Erhöhung des Verletzungsrisikos führt. Zwischen TL 2 und TL 9 ist die Vereinigung der Risikofunktionen der 1. + 2. Sitzreihe auf gleich hohem Niveau. Ein Eingriff, der bei einer ursprünglichen Trefferlage in diesem Bereich ausgeführt wird und nicht zum Erreichen von TL 10 führt, sondern zu einer TL zwischen TL 2 und TL 9, erhöht damit das Verletzungsrisiko nicht über das schon vorher vorhandene Niveau. Führt der Eingriff zum Erreichen von TL 10, sinkt das Risiko für die 1. + 2. Sitzreihe erheblich.

**Anforderung 1 (Zieltrefferlage (TL 10))** Die Verletzungsschwere der Insassen des gestoßenen Fahrzeugs wird wesentlich durch die Trefferlage beeinflusst. Entsprechend den Risikofunktionen ist eine Trefferlage, bei der der linke Längsträger die Hinterachse trifft (TL 10), am günstigsten bezüglich der zu erwartenden Unfallschwere.

### 3.1.3 Einfluss der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs beschränkt die maximale Energieübertragung. Dabei wird im Stoß eine Kraftübertragung ausgeübt, die sich entweder als Reibung, Scherung, Hubarbeit, Deformation oder als eine translatorische bzw. rotatorische Bewegungsänderung der Fahrzeuge auswirkt. Die tatsächlich umgesetzte Energie ist in jedem Unfall abhängig von der Stoßkonfiguration und den Fahrzeugen. Obwohl in der Literatur der Einfluss von Kompatibilität und Gewichtsverhältnis als zu berücksichtigender Faktor untersucht wird, beschränkt sich der folgende Abschnitt auf die Bewertung des Geschwindigkeitseinflusses auf die Höhe des resultierenden Verletzungsrisikos durch Intrusion und Rotation. Dabei stellen die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Risikofunktionen der Trefferlage den Verlauf des Risikos durch Intrusion und Rotation dar, dessen absolute Höhe wird jedoch durch die Geschwindigkeit beeinflusst. Die kinetische Energie berechnet sich in der klassischen Mechanik mit:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Für die in Abbildung 3.4 dargestellte Kollision ergibt die maximale<sup>26</sup> im Stoß umgesetzte Energie:

$$E_{max} = \frac{1}{2} m_{S_2} \cdot v_{KolS_2}^2 \cdot$$

Die Anteile der Energieumsetzung können über den Energieerhaltungssatz der beiden Fahrzeuge vor und nach der Kollision bestimmt werden:

$$\begin{aligned} E_{T_{S_2}} + E_{T_{S_1}} + E_{R_{S_2}} + E_{R_{S_1}} = \\ E'_{T_{S_2}} + E'_{T_{S_1}} + E'_{R_{S_2}} + E'_{R_{S_1}} \\ + E_{D_{S_2}} + E_{D_{S_1}} + E_{Rest} \cdot \end{aligned}$$

---

<sup>26</sup>Unter Vernachlässigung der potenziellen Energie.

Wobei  $E$  die Energie vor der Kollision und  $E'$  die Energie danach angibt, mit jeweils einem rotatorischen ( $R$ ), translatorischen ( $T$ ), deformatorischen ( $D$ ) und einem restlichen<sup>27</sup> ( $Rest$ ) Anteil. Aus der translatorischen Geschwindigkeitsänderung des Egofahrzeugs  $\Delta v$ , ergibt sich damit die Höhe der umgesetzten Energie für jede Stoßkonfiguration. Für eine feste Kollisionsgeschwindigkeit  $v_{Kol}$  variiert  $\Delta v$  in Abhängigkeit der Trefferlage, bedingt durch zwei Faktoren. Zum einen beeinflusst die Kompatibilität, ausgedrückt über die Steifigkeit, die Plastizität des Stoßes (Stoßzahlhypothese  $k$ ). Zum anderen beeinflussen, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, das Massenverhältnis und die Trefferlage über die Entfernung zum Schwerpunkt  $l_{y_{Kol}}$  den Stoßantrieb  $P$  und damit das Verhältnis zwischen den drei betrachteten Energien. Johannsen (2013, Abschnitt 4.7.3) gibt die Stoßgleichungen an mit:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot (v'_{S1x} - 0) &= -P \\ m_1 \cdot (v'_{S1x} - 0) &= 0 \\ \Theta_{S1} \cdot (\omega'_{S1} - 0) &= -P \cdot l_{y_{Kol}} \\ m_2 \cdot (v'_{S2x} - (-v_{KolS2})) &= P \\ m_2 \cdot (v'_{S2y} - 0) &= 0 \\ \Theta_{S2} \cdot (\omega'_{S2} - 0) &= 0. \end{aligned}$$

Damit ergibt sich mit der Stoßzahlhypothese  $k$  und dem als homogen angenommenen Flächenträgheitsmoment des gestoßenen Fahrzeugs:

$$\Theta_{S1} = \frac{1}{12} \cdot (a^2 + b^2),$$

der Stoßantrieb zu:

$$P = \frac{(1+k) \cdot m_1}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + m_1 \cdot \frac{l_{y_{Kol}}^2}{\Theta_{S1}}} \cdot v_{KolS2}$$

---

<sup>27</sup>Der restliche Anteil beschreibt alle Effekte die nicht explizit berücksichtigt sind, beispielsweise die Energie, die in Scherung, Reibung und Hubarbeit umgesetzt wird.

und die Geschwindigkeit von  $S_2$  nach der Kollision zu:

$$v'_{S2x} = \frac{P}{m_2} - v_{KolS2} = - \frac{(1 - k \cdot \frac{m_1}{m_2}) + \frac{m_1 \cdot l_{yKol}^2}{\Theta_{S1}}}{(1 + \frac{m_1}{m_2}) + \frac{m_1 \cdot l_{yKol}^2}{\Theta_{S1}}} \cdot v_{KolS2}.$$

Durch die Vereinfachung und die idealen Annahmen hat das stoßende Fahrzeug auch nach dem Stoß keine rotatorische Geschwindigkeitskomponente:

$$\omega'_{S2} = 0.$$

Damit ergibt sich  $\Delta v$  zu:

$$\Delta v = v_{KolS2} - v'_{S2x}$$

und die im Stoß umgesetzte Energie zu:

$$E_{Gesamt} = \frac{1}{2} m \cdot \Delta v^2.$$

Für das gestoßene Fahrzeug ergibt sich durch Auflösung der Stoßgleichungen eine translatorische Geschwindigkeit in Richtung des Stoßes:

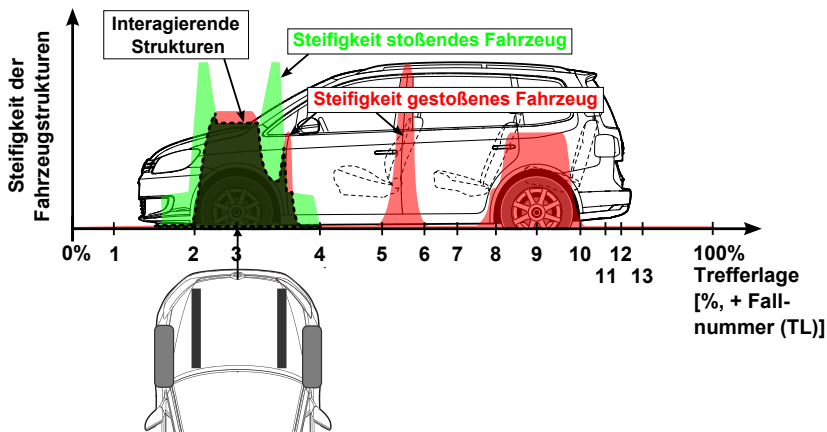
$$v'_{S1x} = - \frac{P}{m_1} = - \frac{1 + k}{(1 + \frac{m_1}{m_2}) + m_1 \cdot \frac{l_{yKol}^2}{\Theta_{S1}}} \cdot v_{KolS2}$$

und eine rotatorische Geschwindigkeit:

$$\omega'_{S1} = - \frac{P \cdot l_{yKol}}{\Theta_{S1}} = - \frac{(1 + k) \cdot m_1 \cdot l_{y1}}{(1 + \frac{m_1}{m_2}) \cdot \Theta_{S1} + m_1 \cdot l_{yKol}^2} \cdot v_{KolS2}.$$

In Abhängigkeit der Steifigkeit und der Trefferlage variiert damit das Verhältnis zwischen umgesetzter Verformungs- und Bewegungsenergie im Stoß. Die

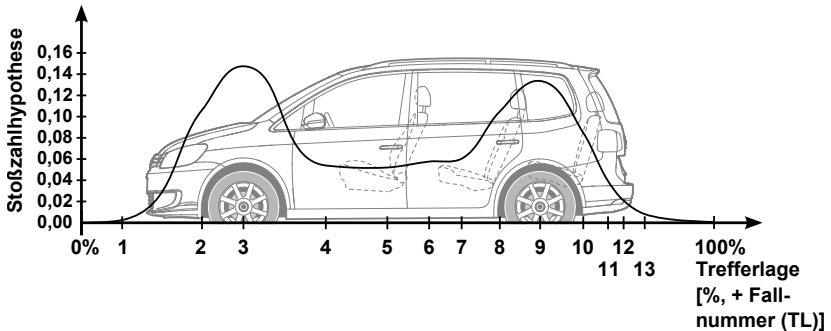
Steifigkeit ist abhängig vom Interface. Ein beispielhafter Verlauf, der die steifen Elemente beider Fahrzeuge zeigt, ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Schnittmenge beschreibt damit die interagierenden Strukturen. Gemäß des in Abbildung 3.2 vorgestellten Mehrkörpermodells ist dabei die maximal übertragbare Energie durch den größten Widerstand limitiert, da sich danach eine plastische Verformung der weicheren Teile der zuerst nachgebenden Fahrzeugstruktur einstellt.



**Abbildung 3.10:** Qualitative Einschätzung der Steifigkeit der Fahrzeugstrukturen im Seitencrash. Hervorgehoben ist die Schnittfläche der interagierenden Strukturen bei TL 3.

Für den Seitencrash existieren keine genauen veröffentlichten Angaben der Stoßzahl in Abhängigkeit der Trefferlage über die Geschwindigkeit, insbesondere nicht für Fahrzeuge mit Baujahr nach 1998 (Post-NCAP). Monson & Germane (1999) untersuchen anhand älterer NHTSA Seiten-Crash-Versuche die Stoßzahl und geben einen Durchschnittswert zwischen 0,12 und 0,08, bei Geschwindigkeiten zwischen 48 km/h und 56 km/h, an. In den Versuchen sind die Trefferlagen nicht eindeutig kodiert und die individuellen Schwankungen sehr stark (zwischen 0,001 und 0,225). Gleichzeitig weisen sie auf eine abnehmende Tendenz für höhere Geschwindigkeiten hin. In einer spä-

teren Folgeuntersuchung bestimmen Germane et al. (2003) mittels eines Experiments (gestoßenes Fahrzeug Ford Taurus Bj. 1995, stoßendes Fahrzeug Chevrolet Tahoe Bj. 1996) ein  $k$  von 0,15 rechnerisch und 0,11 experimentell für  $v_{KolS2} = 48,6 \text{ km/h}$ ,  $v_{KolS1} = 38,6 \text{ km/h}$ ,  $\Delta v = 24 \text{ km/h}$  bei einer Trefferlage zwischen TL 2 und TL 3. Cummings et al. (2010) untersuchen die Frontsteifigkeit für neuere Fahrzeuge der Baujahre 2000 bis 2009, vergleichen diese mit den Baujahren von 1980 bis 1989 und finden dabei für „Passenger Cars“ eine Erhöhung zwischen 25 % und 50 %. Lee et al. (2014) bestätigen die Größenordnung dieser Werte für SUVs, Vans und Passengers Cars und finden denselben Anstieg auch für die Seitensteifigkeiten.



**Abbildung 3.11:** Relativer Verlauf der Stoßzahl  $k$  über die Trefferlage für einen generischen Stoß anhand der jeweiligen Schnittflächen aus Abbildung 3.10. Normiert bei TL 3 auf  $k = 0,15$ .

Abbildung 3.11 zeigt eine qualitative Schätzung der Stoßzahl anhand der Schnittmengen aus Abbildung 3.10. Diese ist bei TL 3 normiert auf den von Germane et al. (2003) angegebenen Wert von 0,15.<sup>28</sup> Daher ist die Stoß-

<sup>28</sup>Genauere Werte bedürfen für jede Stützstelle einer Validierung im Crash-Versuch und finden sich in den entsprechenden EES-Katalogen der Hersteller. Diese Kataloge unterliegen jedoch den Betriebsgeheimnissen der jeweiligen Hersteller und sind mit Ausnahme des Katalogs von Daimler Benz aus dem Jahr 1990 nicht veröffentlicht. Eine aus Unfalldaten extrapolierte genauere Version ist in Arbeit und soll in Niebuhr et al. (in Bearbeitung) vorgestellt werden. Siehe auch Niebuhr et al. (2013). Alternativ könnte das Vorgehen aus Brückner (2005) angewendet werden, um das Modell aus Abbildung 3.2 entsprechend zu bedaten.

zahl bei gleicher Kollisionsgeschwindigkeit für die präferierte Zieltrefferlage TL 10 um ca. 60 % größer als im Bereich des Schwerpunkts (TL 4). Dementsprechend ergibt sich ein Unterschied von ca. 3,1m/s für das  $\Delta v$  zwischen TL 4 und TL 10. Damit ist die Trefferlage in doppelter Weise relevant zur Bestimmung der Verletzungsschwere.

Aus den Geschwindigkeiten lassen sich die Energieanteile nach dem Stoß berechnen:

$$\begin{aligned}E_{TS_2} &= \frac{1}{2} m \cdot v_{S_2x}^2 \\E_{RS_2} &= \frac{1}{2} m \cdot \omega_{S_2}^2 = 0 \\E_{TS_1} &= \frac{1}{2} m \cdot v_{S_1x}^2 \\E_{RS_1} &= \frac{1}{2} m \cdot \omega_{S_1}^2.\end{aligned}$$

Eine qualitative Aussage über die Deformationshöhe am gestoßenen Fahrzeug ergibt sich aus der vereinfachten Annahme, dass die Deformation am stoßenden Fahrzeug über alle Trefferlagen in der gleichen Größenordnung erfolgt. Betrachtet man daher  $E_{DS_2} + E_{Rest}$  als beliebige aber feste Werte, beschreibt der Verlauf von  $E_{D_{Gesamt}}$  die Deformationsänderung am gestoßenen Fahrzeug:

$$E_{D_{Gesamt}} = E_{DS_1} + E_{DS_2} + E_{Rest} \approx E_{DS_1}$$

und damit:

$$E_{DS_1} \approx E_{Gesamt} - (E_{TS_2} + E_{TS_1} + E_{RS_1}).$$

Abbildung 3.12 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeiten und der daraus abgeleiteten Energieanteile über die Trefferlage. Dargestellt ist anhand von  $\Delta v$  die umgesetzte Energie  $E_{Gesamt}$ . Diese verteilt sich je nach Abstand zum Schwerpunkt auf einen translatorischen, einen rotatorischen und einen deformatorischen Anteil. Deutlich wird der Zusammenhang zwischen Deformation



und Trefferlage. Je näher die Trefferlage am Schwerpunkt liegt, desto geringer ist die resultierende Rotation und desto höher wird die Deformation.<sup>29</sup>

Der Zusammenhang zwischen  $v_{Kols_2}$  und  $\Delta v$  bleibt damit für jeden Unfall individuell, allerdings besteht ein Zusammenhang zwischen  $\Delta v$  und der Trefferlage. Somit ist ein verringertes  $v_{Kols_2}$  nur in Fällen sinnvoll, in denen auch das  $\Delta v$  entsprechend sinkt. Daran wird deutlich, dass die Verschiebung einer Trefferlage, die ursprünglich vor dem Fahrzeugschwerpunkt lag (TL 1 bis TL 4), weiter nach hinten zunächst mit einem stark ansteigenden Risiko verbunden ist. Ein Eingriff zur Verschiebung der Trefferlage aus dem Bereich der Fahrgastzelle nach hinten reduziert den Einfluss der Geschwindigkeit aber in praktisch jedem Fall und damit auch die absolute Höhe der Risikofunktionen.

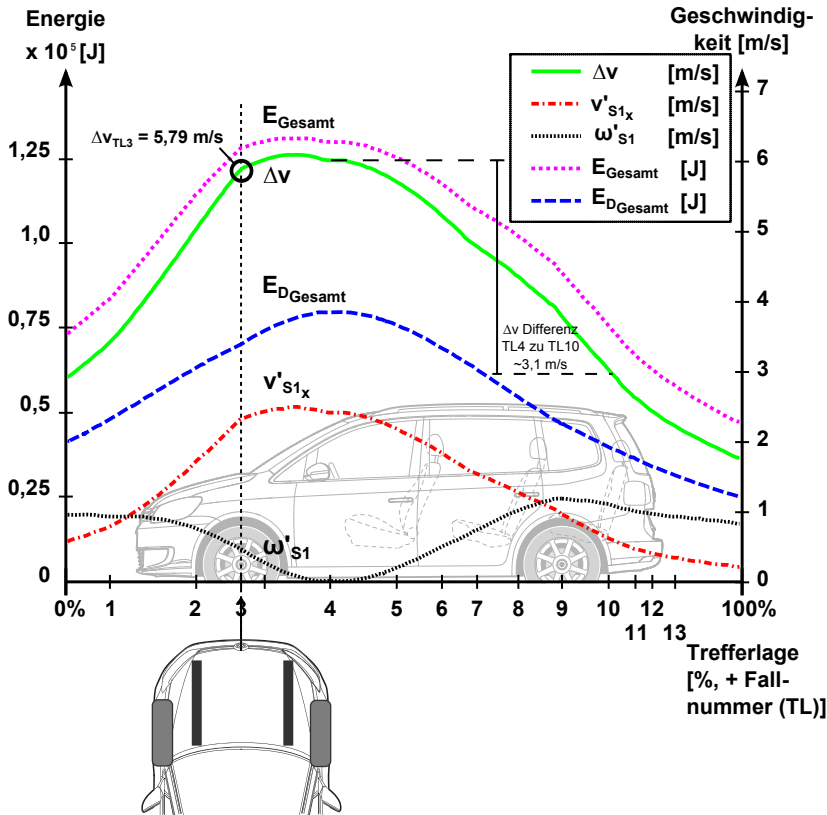
Daher ergeben sich für ursprüngliche Trefferlagen im Bereich des Vorderwagens zwei Anforderungen. Falls nicht sichergestellt werden kann, dass bei einer Verschiebung die Zieltrefferlage (TL 10) erreicht wird, sollte die Verschiebung nicht bis in den Bereich der Fahrgastzelle führen. Zusätzlich muss bei einem Eingriff abgeschätzt werden, wie sich die Geschwindigkeitsänderung in der Kollision verändert. Der Abbau der Kollisionsgeschwindigkeit sollte durch die Trefferlagenänderung nicht zu einer Erhöhung der Geschwindigkeitsänderung in der Kollision führen.

**Anforderung 2 (Alternative Trefferlage (TL 2))** *Für ursprüngliche Trefferlagen im Bereich des Vorderwagens ist das Risiko hoch, dass durch eine Verschiebung die Fahrgastzelle getroffen wird. Entsprechend der Risikofunktionen ist eine Trefferlage, bei der der rechte Längsträger die Vorderachse trifft (TL 2), am günstigsten bezüglich der zu erwartenden Unfallschwere.*

**Anforderung 3 (Reduktion der Geschwindigkeitsänderung)** *Bei der Verschiebung der Trefferlage in Richtung des Schwerpunkts steigt das zu erwartende  $\Delta v$  der Kollision. Ein Eingriff zur Verschiebung sollte sicherstellen, dass*

---

<sup>29</sup> An der Stützstelle TL 3 weist die Berechnung eine Differenz im  $\Delta v$  von +0,43 m/s zum Versuch von Germane et al. (2003) ( $\Delta v = 5,36$  m/s) auf. Diese Differenz ist auf die Vereinfachungen bei der Berechnung und dem unklaren Messzeitpunkt zur  $\Delta v$  Bestimmung zurückzuführen. In der vorhandenen Richtigkeit lässt sich das Diagramm dennoch nutzen, um den qualitativen Zusammenhang der Größen zu verdeutlichen.



**Abbildung 3.12:** Verlauf der Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v$ ) und der dabei umgesetzten Energie  $E_{\text{Gesamt}}$  in Abhängigkeit der Trefferlage. Für das querende Fahrzeug  $S_1$  sind die translatorische ( $v'_{s1x}$ ) und rotatorische Geschwindigkeit ( $\omega'_{s1}$ ) nach der Kollision dargestellt.  $E_{D_{\text{Gesamt}}}$  dient als Proxyvariable zur Beschreibung des Verlaufs der Deformation am gestoßenen Fahrzeug ( $E_{D_{S_1}}$ ). Berechnung für  $m_1 = 1538 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 2000 \text{ kg}$ ,  $a_1 = 1808 \text{ mm}$ ,  $b_1 = 4877 \text{ mm}$ ,  $a_2 = 1941 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 4788 \text{ mm}$ ,  $v_{KolS_1} = 0 \text{ m/s}$ ,  $v_{KolS_2} = 13,41 \text{ m/s}$ ,  $k$  nach Abbildung 3.11, Schwerpunkt bei  $0,4 \cdot b_1$ . Das berechnete  $\Delta v$  bei TL 3 weist damit eine Differenz von  $+0,43 \text{ m/s}$  zum Versuch von Germane et al. (2003) ( $\Delta v = 5,36 \text{ m/s}$ ) auf.

*das zu erwartende  $\Delta v$ , auch im Falle des Nichterreichens der Zieltrefferlage, kleiner gleich dem ursprünglichen  $\Delta v$  ist.*

Im nächsten Abschnitt 3.2 wird  $\Delta v$  als Proxyvariable für die umgesetzte Energie im Stoß unabhängig von der tatsächlichen Kollisionsgeschwindigkeit verwendet, da  $\Delta v$  in der Unfallrekonstruktion aus der Intrusion unter Kenntnis der Fahrzeugeigenschaften ausgerechnet und angegeben wird. Die in diesem Abschnitt und in den folgenden Kapiteln errechneten Werte können daher nicht direkt auf die Unfallanalyse bezogen werden, sondern sind immer abhängig von der tatsächlichen Kollisionsgeschwindigkeit.

## 3.2 Wirkfeld im Querverkehr

Das Wirkfeld beschreibt die Menge der adressierbaren Unfälle.<sup>30</sup> Als Berechnungsgrundlage werden die Unfalldaten einer Verkehrsdomäne<sup>31</sup> oder eines Erhebungsbereichs<sup>32</sup> verwendet. Diese Menge wird eingeschränkt durch die vom System adressierbaren Unfalltypen<sup>33</sup> und Unfallgegner.

FHWA (2001) sah die Unfallzahlen für die USA im Jahr 2000 als Auslöser für ein nationales Programm zur Erhöhung der Sicherheit im Kreuzungsbereich. Dort kam es zu 2,8 Millionen Unfällen mit Pkw im Kreuzungsbereich

---

<sup>30</sup>Busch (2004, Kapitel 3.1) stellt vier Möglichkeiten zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen vor: retrospektive Feldbewertung, detaillierte Einzelbewertung, Analyse mit Szenariotechnik und Wirkungsfeld bzw. Wirkungsgrad. Er definiert das Wirkungsfeld als „Gesamtheit aller Unfälle (und den daran Beteiligten), in denen das System gemäß seiner Funktionsbeschreibung eingreifen kann“. Frost & Keller (1989) sowie Klöckner (1991) sehen ein Risiko zur Überbewertung des Nutzens durch die Öffentlichkeit bei der Bewertung mittels Wirkungsfeld. Durch Angabe einer oberen Grenze, des sogenannten „maximal möglichen Nutzens“, wird ein Mehrwert suggeriert. Dieser steht nicht unbedingt im Zusammenhang mit dem „zu erwartenden Nutzen“.

<sup>31</sup>beispielsweise räumlich aufgeteilt in: inner- und außerstädtisch sowie Autobahnen, aber auch Parkhäuser, Spielstraßen, Tunnel etc.

<sup>32</sup>Ein Erhebungsbereich ist definiert durch die räumliche, zeitliche und inhaltliche Art der Unfalldaten bzw. der darauf basierenden Hochrechnung auf ein Land, einen Staat oder Staatenbund.

<sup>33</sup>Eine gebräuchliche Kategorisierung ist der Unfalltypenkatalog des GDV-Verbandes (GDV 1998).

(43,9 % aller Unfälle in den USA). Davon sind 995.000 Unfälle mit Personenschaden (48,1 % aller Unfälle mit Personenschaden in den USA), bei denen es zu insgesamt 1.596.128 Verletzten an der Kreuzung kam. Bei 8.474 Unfällen kam es zu Todesfällen (22,6 % aller Unfälle mit tödlich Verunglückten in den USA). In Japan kam es nach Angabe des „Traffic Bureau“<sup>34</sup> 2006 zu ca. 235.000 Kreuzungsunfällen. Dabei verunfallten durch Fahrzeug-Fahrzeug Kollisionen jeweils mehr als 215.500 Personen leicht, 16.750 schwer und 1.030 tödlich. Bezogen auf die Gesamtzahlen stellt dies einen Anteil von 26,3 % für leicht, 27,5 % für schwer sowie 16,7 % für tödlich Verletzte im Straßenverkehr dar. Diese Beispiele verdeutlichen exemplarisch das qualitative Potenzial zur Erhöhung der Verkehrssicherheit im Kreuzungsbereich. Eine quantitative Angabe zur genaueren Abschätzung benötigt eine detailliertere Betrachtung der verwendeten Datenquellen und getroffenen Einschränkungen.

Im Folgenden wird erläutert, wie diese Unfälle genauer aussehen. Dafür wird eine Analyse, basierend auf der GIDAS, vorgestellt. Anhand dieser GIDAS Analyse werden alle relevanten Merkmale der Unfälle beschrieben. Diese werden, wo nötig, durch weitere Annahmen und Beispiele ergänzt. Eine Hochrechnung der GIDAS Daten auf die Bundesrepublik Deutschland kann beispielsweise mit dem Benefits-Verfahren der Volkswagen Unfallforschung durchgeführt werden. Dieses erlaubt auch eine Effizienzberechnung von Fahrerassistenzfunktionen. Um aussagekräftige Zahlen zu bekommen, müssen dabei jedoch die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Funktionen auf das Verkehrsgeschehen und die daraus resultierenden Anteile der Wirkfeldüberschneidung berücksichtigt werden. Eine genaue Berechnung dieser Effekte ist nicht Teil dieser Arbeit. In Kapitel 6 erfolgt jedoch eine Simulation der Effizienz für eine Reihe von Unfallrekonstruktionen.<sup>35</sup>

### **3.2.1 Wirkfeld anhand GIDAS**

Zur Berechnung des Wirkfeldes und der Effizienz werden in dieser Arbeit die Zahlen aus der GIDAS Datenbank zugrunde gelegt. Dafür wurden alle

---

<sup>34</sup>zitiert nach (Hiramatsu et al. 2008)

<sup>35</sup>Vergleiche Labenski et al. (2014) zur Hochrechnung im EU-Projekt: UR:BAN.

betrachteten Einträge mit den Unfallakten verglichen, um die Richtigkeit der Angaben gegebenenfalls durch Nachkodierung<sup>36</sup> sicherzustellen. Im Folgenden werden zunächst die für das hier vorgestellte System getroffenen Einschränkungen zusammengefasst.

Es werden nur Unfälle mit gestoßenen Fahrzeugen verwendet, deren Baujahr 1998 oder neuer ist, um den Neuerungen der Fahrzeugtechnik (Post-NCAP) besser Rechnung zu tragen bzw. abzubilden, welche Fahrzeuge im Markt sein werden, wenn das vorgestellte System Serienreife erreichen würde. Das in dieser Arbeit vorgestellte Handlungskonzept adressiert nur Kollisionen mit einem (zweiten) Pkw.<sup>37</sup> Die Daten werden räumlich auf Unfälle die inner- und außerorts stattfanden eingeschränkt. Unfälle auf Autobahnen werden nicht ausgewertet. Des Weiteren werden Unfälle, bei denen ein Schleudern vor der ersten Kollision auftrat, nicht ausgewertet.<sup>38</sup> Die ausgewerteten Einbiegen- und Kreuzen-Unfalltypen sind in GIDAS als Typ 30X bis 33X kodiert.<sup>39</sup> Bezeichnet werden diese Unfälle als Durchfahrts- bzw. Abbiegeunfälle. Da das untersuchte System unabhängig vom Unfallhergang konzipiert wird, werden zur Vereinfachung alle Unfälle ausgewertet, bei denen das stoßende Fahrzeug dem gestoßenen frontal in die Seite fährt. Es werden nur Unfälle betrachtet, bei denen alle Insassen angeschnallt waren. Wetterbedingungen, Tageszeiten und Alterseffekte werden nicht betrachtet. Zur Vereinfachung wird nicht zwischen stoßzugewandter und -abgewandter Seite unterschieden.<sup>40</sup>

Wichtig für die spätere Analyse ist die Auswertung der Längen der Fahrzeugbereiche. Abbildung 3.13 zeigt die Verteilung in den GIDAS Fällen und für die in Deutschland neu zugelassenen Fahrzeuge<sup>41</sup> in 2011. Die Vertei-

---

<sup>36</sup>Die Trefferlage wurde insbesondere anhand vorhandener Unfallbilder kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

<sup>37</sup>In GIDAS kodiert als Unfälle mit Pkw, Vans (Mpv), Kleinbussen und Allrad-Fahrzeugen.

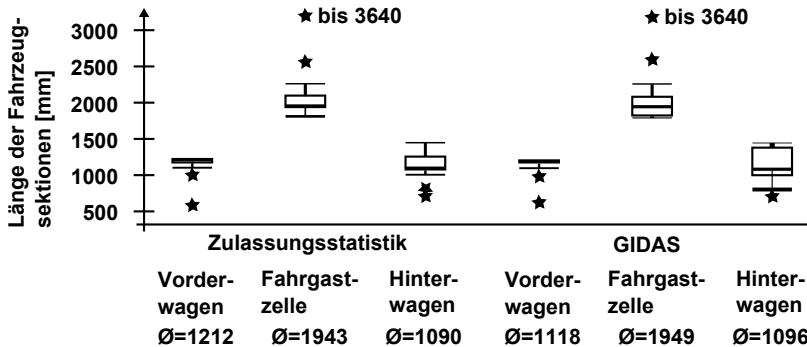
<sup>38</sup>Für die Einführung von ESC können diese Unfälle im Kreuzungsbereich bereits adressiert werden.

<sup>39</sup>Vergleiche Abbildung A.1 im Anhang.

<sup>40</sup>Vergleiche Abschnitt 3.1 zur Begründung und Quellenangabe.

<sup>41</sup>Zur Bestimmung wurden für die 3 Fahrzeuge mit der höchsten Zulassungszahl je Fahrzeugsegment die Werte ausgemessen. Diese Angaben wurden dann anteilig pro Segment gewichtet und gemittelt als Wert für das gesamte Segment angenommen. Die Segmente sind prozentual aufgeführt, wobei jeweils die Fahrzeuge mit den größten Ausreißern extra im Diagramm ange-

lung in der GIDAS Stichprobe entspricht dabei ungefähr der Verteilung in den Zulassungszahlen. Der Median der Fahrgastzellenlänge in GIDAS beträgt 1949 mm, für neuzugelassene Fahrzeuge nach Zulassungsstatistik beträgt er 1943 mm.



**Abbildung 3.13:** Fahrzeugbereichslängen der betrachteten GIDAS Unfälle (n = 286) im Vergleich zu den Neuzulassungen in 2011 nach KBA (2011). Die Längenangaben aus GIDAS sind durch die Angaben zur Fahrzeugklasse und Gesamtlänge sowie durch die zugehörigen Mittelwerte der Zulassungsstatistik für die jeweilige Fahrzeugklasse geschätzt.

Neben der Fahrzeuglänge ist vor allem das Fahrerverhalten der querenden Objekte vor der Kollision von Interesse. Diese Angabe wird in GIDAS mit einer großen Unsicherheit erhoben.<sup>42</sup> Laut Angabe im Datensatz haben ca. 30% der Fahrer der gestoßenen Fahrzeuge reagiert (n = 246). Davon haben 34% der Fahrer vorher gebremst, 22% gelenkt und 44% gleichzeitig gelenkt

geben sind. Die Zulassungszahlen sind von Januar 2011 bis (einschließlich) Dezember 2011 aus KBA (2011). Als Fahrzeugklassen wurde die folgende Einteilung verwendet, die sich in GIDAS und der Zulassungsstatistik findet: Minis, Kleinwagen, untere Mittelklasse, Mittelklasse, obere Mittelklasse, Oberklasse, Geländewagen, Sportwagen, Mini-Vans, Großraum-Vans.

<sup>42</sup>Technische oder auch nur objektive Hinweise auf ein Bremsen vor der Kollision sind extrem selten. Generell spiegeln sich daher in den nicht objektiven Parametern häufig die Sichtweise und das Mind-Set des Rekonstruktors (auch in der abschließenden Unfallsimulation) wieder. Vergleiche z.B. Unselt & Eckstein (2004).

und gebremst. In der Literatur finden sich nur vereinzelt Angaben zum Fahrerverhalten vor einer Querverkehrskollision.<sup>43</sup> Meitinger (2008, Abschnitt 3.2.3) gibt basierend auf der GIDAS Analyse im INVENT Projekt an, dass weniger als 40 % der Fahrer bremsen und weniger als 20 % lenken. Klanner (2008, Abschnitt 3.2) zitiert Hannawald<sup>44</sup>, wonach 58 % der Fahrer bremsen und 40 % ausweichen. Es existieren keine Untersuchungen zur Anzahl von „Beinahe-Unfällen“, bei denen eine Fahrerreaktion ausgereicht hat, um einen Querverkehrs-Unfall zu verhindern. Die geringe Anzahl der Fahrerreaktionen findet sich in ähnlicher Größenordnung in den durchgeführten Probandenversuchen.<sup>45</sup> Zu untersuchen wäre zukünftig, ob es durch die prinzipiell einfache Vermeidbarkeit einer Kollision durch Bremsung zu einem erhöhten Anteil an vermiedenen Kollisionen im Vergleich zum Längsverkehr kommt. Dies würde begründen, warum der Anteil der Fahrerreaktionen in der Gruppe der verunfallten Fahrzeuge gering ist. Eine andere Erklärung liegt möglicherweise in den Einflussfaktoren, die eine Unfallverursachung im Querverkehr begünstigen. Staubach (2009b, Abschnitt 7.4) gibt Sichtverdeckung als den Haupteinflussfaktor an. Im Gegensatz zum Längsverkehr ist daher die Anzahl der Fahrer, die eine Gefahrensituation rechtzeitig vorher korrekt identifizieren können, im Querverkehr geringer.

Abbildung 3.14 zeigt die Aufteilung der Fälle auf die drei Seitenbereiche und unterscheidet zwischen Fahrer- und Beifahrerseite. Um zu entscheiden, ob die Unfälle getrennt nach stoßzugewandter und stoßabgewandter Seite zu untersuchen sind, spielen der Besetzungsgrad und die Qualität der Kodierung der Sitzpositionen eine Rolle. Der Besetzungsgrad variiert je nach Wegzweck. Follmer et al. (2008, Abschnitt 3.3.1) geben den durchschnittlichen Besetzungsgrad über alle Fahrten in Deutschland mit 1,5 an. In GIDAS ist der Besetzungsgrad teilweise fehlerhaft, da in einigen Fällen nur die verletzten Insassen kodiert sind. Teilweise werden die unverletzten Personen auf das Fahrzeuggewicht addiert. Eine nachträgliche Überprüfung ist aufgrund des durch Ausstattungsmerkmale schwankenden Fahrzeuggewichts nicht mit

---

<sup>43</sup>Durch einen Literaturvergleich kommt Adams (1994) zu dem Ergebnis, dass Fahrer in Gefahrensituationen entweder bremsen oder lenken.

<sup>44</sup>Lars Hannawald: „Unfallanalyse zur Entwicklung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen im Kreuzungsbereich“, Forschungsbericht VUFO 2005.

<sup>45</sup>Vergleiche Abschnitt 5.2.

ausreichender Sicherheit möglich. In GIDAS findet sich ein Besetzungsgrad von 1,4.

O'Brien (2010, Abschnitt 5.2.1) untersucht die Gesamtheit der Unfälle in GIDAS und findet eine relativ gleichmäßige Häufigkeitsverteilung der Stoßrichtung zwischen Fahrer- und Beifahrerseite und damit einen etwa gleich hohen Anteil an stoßzugewandten und stoßabgewandten Fällen. O'Brien (2010, Abschnitt 5.2.1) kann keinen signifikanten Unterschied in der Verletzungsschwere der einzelnen Seiten finden.<sup>46</sup> Dass die Verteilung zwischen den Seiten hier so eindeutig in Richtung der stoßzugewandten Seite ausfällt, liegt möglicherweise an der kleineren Stichprobe der nachkodierte Unfälle. Aufgrund der geringen Anzahl dieser Fälle wird daher zur Beschreibung der technischen Aspekte der Unfälle immer der gesamte Datensatz verwendet, unabhängig von der Stoßrichtung und der Verletzungsschwere. Die Auswertungen bezogen auf die Unfallschwere beziehen sich auf die 184 Fälle auf der stoßzugewandten Seite, mit eindeutig nachkodierte Trefferlagen und einer Unfallschwere von mindestens ISSx > 0,5.<sup>47</sup>

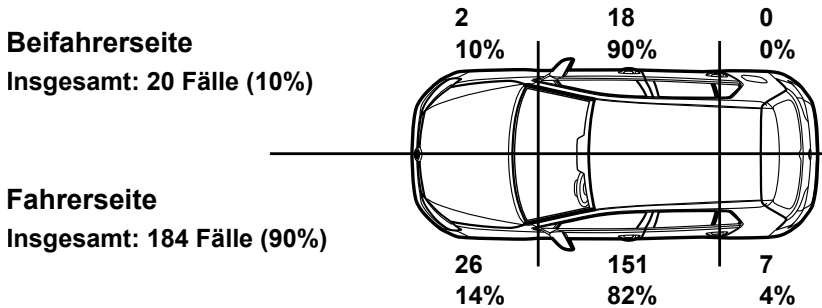
In Tabelle A.2 sind tabellarisch die Geschwindigkeiten bei Kollision für beide Fahrzeuge angegeben. Diese werden in Abschnitt 3.3.1 aufgegriffen, um die Anforderungen für die Öffnungswinkel der verwendeten Sensoren zu diskutieren. Abbildung 3.15 zeigt die Ausgangsgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge in einer Gefahrensituation in GIDAS. Kollisionen, bei denen das stoßende Fahrzeug 64 km/h oder schneller (Ausfahrtstraßen) fährt, stellen nur einen kleinen Anteil (8 %) der Fälle dar. Gemäß Tabelle A.2 besteht dabei ein Geschwindigkeitsverhältnis zwischen den Fahrzeugen, bei dem

---

<sup>46</sup>Stolinski et al. (1998) beschreiben die Kollision und die Auswirkungen für einen einzelnen Fahrer auf der stoßabgewandten Seite. Für diesen ergibt sich vor allem ein anderes Verletzungsbild als auf der stoßzugewandten Seite, da der Torso mangels Gurtstraffer aus dem Schultergurt rutscht. Gabler et al. (2005) weisen auf das erhöhte Verletzungsrisiko, für die Insassen auf der stoßabgewandten Seite, im Falle eines Fahrgastzellentreffers hin. Im Gegensatz zu Treffern im Vorder- oder Hinterwagen kommt es dabei durch die verstärkte Intrusion zu höheren Verletzungsschweren. Newland et al. (2008) beschreiben ein erhöhtes Verletzungsrisiko, wenn zusätzlich ein Beifahrer im Fahrzeug sitzt, durch die Interaktion der beiden Insassen im Stoß. Fildes & Digges (2010) fassen eine Reihe an Studien zusammen, die unfallrelevante Aspekte und Unterschiede für die stoßabgewandte Seite im Detail beschreiben. Vergleiche die weiteren Einschränkungen aus Fußnote 5.

<sup>47</sup>Es muss mindestens eine AIS 1 Verletzung in zwei ISS-Körperregionen vorliegen.





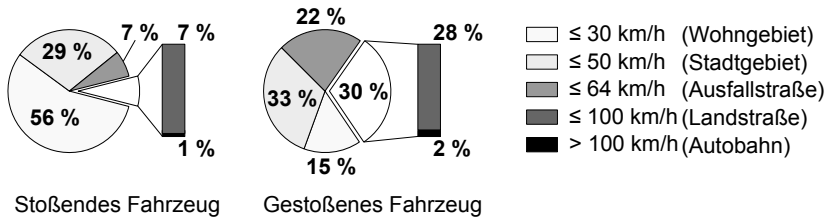
**Abbildung 3.14:** Verteilung aller in der Stichprobe enthaltenen Unfälle mit  $ISS_x > 0,5$  auf die verschiedenen Fahrzeugbereiche ( $n = 205$ ).

das stoßende Fahrzeug schneller ist als das gestoßene Fahrzeug. Nur in ca. 20 % der Fälle ist das gestoßene Fahrzeug schneller als das stoßende. Im Durchschnitt beträgt die Ausgangsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs  $\bar{v}$  ( $54 \pm 23,6$ ) km/h und die des gestoßenen Fahrzeugs  $\bar{v}$  ( $34 \pm 22,2$ ) km/h ( $n = 258$ ). Die Kollisionsgeschwindigkeit  $v_{Kol}$  ist jeweils etwas langsamer und beträgt für das stoßende Fahrzeug  $\bar{v}$  ( $45 \pm 21,0$ ) km/h und  $\bar{v}$  ( $31 \pm 17,9$ ) km/h für das gestoßene Fahrzeug ( $n = 258$ ).<sup>48</sup>

### 3.2.2 Unfallanalyse des Wirkfeldes

Im Folgenden wird der Einfluss der Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v$ ) und der Einfluss der Kollisionsgeschwindigkeit ( $v_{Kol}$ ) jeweils in Abhängigkeit der Trefferlage auf die Verletzungsschwere des Gestoßenen untersucht. Um Unterschiede aufgrund der Trefferseite (stoßzugewandt und stoßabgewandt) für diese Detailauswertung auszuschließen, wurden nur Treffer auf der stoßzugewandten Seite berücksichtigt ( $n = 185$ ). Die Fälle werden in drei Gruppen

<sup>48</sup>Durch die Angabe der Standardabweichung wird eine Normalverteilung der Stichprobe impliziert. Diese Annahme ist durch die Art der Unfallerhebung vermutlich fehlerhaft. Zur Vollständigkeit sind hier daher noch die Mediane angegeben. Der Median der Ausgangsgeschwindigkeit beträgt für das stoßende Fahrzeug 54 km/h und 28 km/h für das gestoßene Fahrzeug. Der Median der Kollisionsgeschwindigkeit ( $v_{Kol}$ ) beträgt für das stoßende Fahrzeug 45 km/h und 27 km/h für das gestoßene Fahrzeug ( $n = 258$ ).



**Abbildung 3.15:** In GIDAS angegebene Ausgangsgeschwindigkeiten, jeweils für stoßendes und gestoßenes Fahrzeug ( $n = 258$ ). Gruppirt nach fünf Geschwindigkeitsbereichen, die stellvertretend für eine Straßenkategorie stehen. Im vorliegenden GIDAS Auszug ist die „Straßenart“ und die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht kodiert. Die Einteilung der Ortslage ist im Verhältnis 74 % innerorts zu 26 % außerorts angegeben.

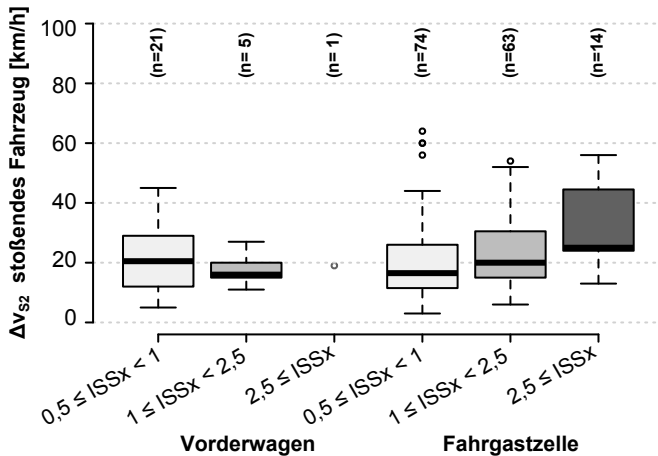
ausgewertet. Nicht enthalten sind Unfälle mit einem  $ISSx \leq 0,5$ . Diese Unfälle mit leichten bzw. keinen Verletzungen sind im Datensatz<sup>49</sup> in einer nicht repräsentativen Menge (undersampling) bezogen auf ihre Auftretenshäufigkeit enthalten. Zudem sind die Verletzungen im Vergleich zu den anderen Gruppen nahezu marginal. Für die Fahrgastzelle sind insgesamt nur 6 Fälle in der GIDAS Stichprobe enthalten, die allen Kriterien genügen. Aufgrund der geringen Anzahl wurden sie daher nicht mit ausgewertet.<sup>50</sup>

Abbildung 3.16 zeigt die Verteilung der Unfallschwere der untersuchten Fälle bezogen auf das  $\Delta v_{S2}$  des stoßenden Fahrzeugs. Da das  $\Delta v_{S2}$  über die statische Deformation des Vorderwagens bestimmt wird, für die sehr viel Erfahrung vorliegt, sind die bei der Rekonstruktion entstehenden zufälligen Fehler vermutlich gering.<sup>51</sup> Die Mediane im Bereich der Fahrgastzelle (16,5/20,0/25,0 km/h) steigen konstant und zeigen sehr deutlich den Zusammenhang zwischen Verletzungsschwere und Geschwindigkeitsabbau des

<sup>49</sup> Bedingt durch die GIDAS Methodik, bei der nur Unfälle mit Personenschaden von den Datenerhebungsteams angefahren werden, ist die Stichprobe der Unfälle mit sehr leichten bzw. unverletzten Personen im Verhältnis zur Häufigkeit dieser Unfälle nicht repräsentativ.

<sup>50</sup> Jeweils 3 Fälle in der ersten Gruppe ( $0,5 \leq ISSx < 1$ ) und in der zweiten Gruppe ( $1 \leq ISSx < 2,5$ ). Die Geschwindigkeiten bewegen sich im Bereich der Werte für den Vorderwagen.

<sup>51</sup> Unberührt davon bleiben systematische Fehler.



**Abbildung 3.16:** Verteilung der Unfallschwere des gestoßenen Fahrzeugs in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsänderung des stoßenden Fahrzeugs in der Kollision  $\Delta v_{S2}$  sowie der Trefferlage. Die Unfallschwere ist in drei Gruppen ( $0,5 \leq \text{ISSx} < 1$ ,  $1 \leq \text{ISSx} < 2,5$  und  $2,5 \leq \text{ISSx}$ ) eingeteilt und jeweils für den Bereich des Vorderwagens und der Fahrgastzelle angegeben. Für die Fahrgastzelle ergibt der Kruskal-Wallis Test (Chi-Quadrat Approximation) eine Signifikanz von  $p = 0,00096$ .

Stoßenden in der Kollision.<sup>52</sup> Die  $\Delta v_{S2}$  Bereiche sind mit jeweils fünf Stundenkilometer Abstand sehr eng gestuft. Damit hat schon eine geringfügige Änderung des  $\Delta v_{S2}$  – wie in Abbildung 3.12 gezeigt, die alleine durch die Trefferlagenänderung (bei gleicher Kollisionsgeschwindigkeit) möglich ist – große Konsequenzen auf die Verletzungswahrscheinlichkeit.

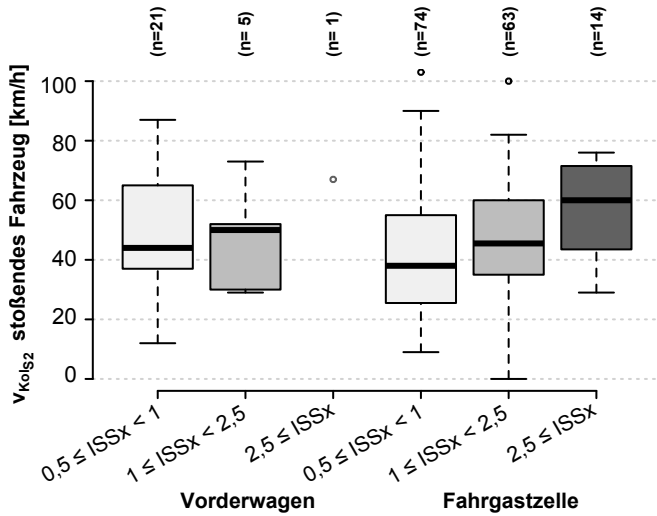
<sup>52</sup>Zum Nachweis der Unterschiede zwischen den drei Unfallschweregruppen wurde der Kruskal-Wallis Test verwendet. Vergleiche Kruskal & Wallis (1952) und Kruskal & Wallis (1953). Im Bereich des Vorderwagens ist die exakte Bestimmung mit der von Meyer & Seaman (2013) berechneten Tabelle möglich. Für die Fahrgastzelle wird eine Chi-Quadrat Approximation verwendet, die nach Graf & Henning (1987, Seite 255) für  $n_i > 5$  zulässig ist. Für den Bereich des Vorderwagens kann, aufgrund des einzelnen bzw. nur geringfügig differenzierten Wertes für die dritte Gruppe, kein signifikanter Unterschied mit  $p \leq 0,1$  bestimmt werden. Dementsprechend werden keine Werte für den Vorderwagen angegeben. Die Angaben für die Fahrgastzelle finden sich in der jeweiligen Abbildungsbeschreibung.

Analog dazu wurden die Mediane der Fahrgastzelle auf die Kollisionsgeschwindigkeit (38,0/45,5/60,0 km/h) bezogen (Siehe Abbildung 3.17). Daran wird deutlich, dass die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit für Trefferlagen in der Fahrgastzelle auch einen Einfluss auf die Verletzungsschwere hat. Zur Definition, ab welcher Geschwindigkeit ein Fahrgastzellentreffer vermieden werden sollte, kann man sich am  $\Delta v_{S2}$  orientieren. Um schwere Verletzungen auszuschließen, sollte die Verletzungsschwere bei einem  $ISSx > 2,5$  mit hoher Sicherheit (95 %) vermieden werden. Die Wahrscheinlichkeit einer  $ISSx > 1$  Verletzungsschwere sollte auch minimiert werden.  $ISSx > 1$  entspricht in etwa der MAIS 2+, der Grenze zu schweren Verletzungen. Das 25 % Perzentil der  $ISSx > 1$  Gruppe ist relativ stabil. Eine obere Grenze des resultierenden  $\Delta v_{S2}$  kann daher in Abbildung 3.16 aus den Angaben der drei Gruppen abgelesen werden. Der Median der 1. Gruppe sollte nicht überschritten werden. Der Wert sollte unterhalb des 25 % Perzentils der 2. Gruppe und höchstens im Bereich der 5 % Grenze der 3. Gruppe liegen. Der resultierende Wert liegt daher im Bereich des Medians der 1. Gruppe von 16,5 km/h. Um sicherzustellen, dass dieser Wert nicht überschritten wird, sollte die Kollisionsgeschwindigkeit nicht höher als 20 km/h liegen.

**Anforderung 4 (Vermeidung der Fahrgastzelle)** *Die Verletzungsschwere der Insassen des gestoßenen Fahrzeugs wird wesentlich durch die Trefferlage beeinflusst. Eine Trefferlage im Bereich der Fahrgastzelle (TL3 bis TL9) ist für alle Kollisionen mit  $v_{KolS2} \geq 20$  km/h möglichst zu vermeiden.*

Im Bereich des Vorderwagens gibt es insbesondere in der zweiten Gruppe nur noch eine geringe Anzahl an Fällen ( $n=5$ ). Die dritte Gruppe ist mit einem Fall nur der Vollständigkeit halber angegeben. Der Vergleich zwischen Vorderwagen und Fahrgastzelle ergibt (mit einer Ausnahme), dass die Geschwindigkeitsmediane der Unfallschweregruppen höher sind als ihre jeweiligen Pendants im Bereich der Fahrgastzelle. Es wird sowohl ein höheres  $\Delta v_{S2}$  als auch ein  $v_{KolS2}$  benötigt, um die gleiche Verletzungswahrscheinlichkeit zu erreichen.

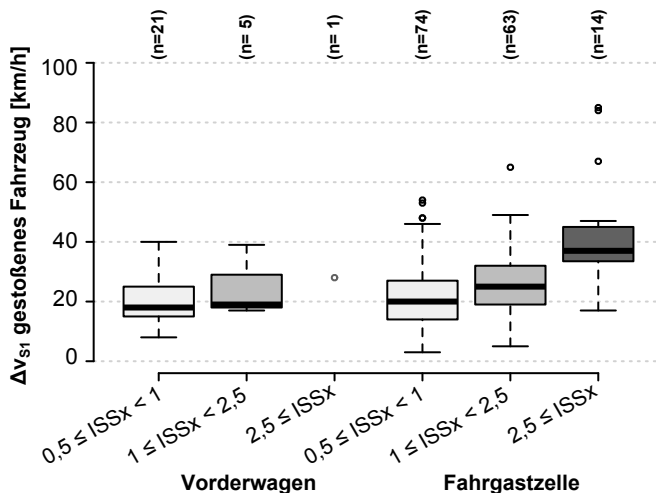
Abbildung 3.19 zeigt den (geringen) Einfluss der Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs. Im Bereich der Fahrgastzelle ergibt sich fast kein Unterschied des Geschwindigkeitsmedians für die ersten beiden Gruppen



**Abbildung 3.17:** Verteilung der Unfallschwere des gestoßenen Fahrzeugs in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs in der Kollision  $v_{KolS2}$  sowie der Trefferlage. Die Unfallschwere ist in drei Gruppen ( $0,5 \leq ISSx < 1$ ,  $1 \leq ISSx < 2,5$  und  $2,5 \leq ISSx$ ) eingeteilt und jeweils für den Bereich des Vorderwagens und der Fahrgastzelle angegeben. Für die Fahrgastzelle ergibt der Kruskal-Wallis Test (Chi-Quadrat Approximation) eine Signifikanz von  $p = 0,000014$ .

(26,5/25,0 km/h). Diese Uneindeutigkeit liegt vermutlich an den unterschiedlich steifen Seitenstrukturen, Curtainairbags und B-Säulen Positionen. Die Geschwindigkeitsänderung in Abbildung 3.18 zeigt jedoch den gleichen Trend wie beim stoßenden Fahrzeug. Je mehr Energie auf das Fahrzeug übertragen wird, desto höher fällt auch die Verletzungswahrscheinlichkeit aus.

Vergleicht man stoßendes mit gestoßenem Fahrzeug, zunächst im Bereich der Fahrgastzelle, ist der Unterschied der Kollisionsgeschwindigkeiten besonders deutlich (38,0/45,5/60,0 km/h) zu (26,5/25,0/33,5 km/h). Während die Geschwindigkeit des Gestoßenen (für alle Gruppen) ungefähr im Bereich der Durchschnittsgeschwindigkeit im innerstädtischen Bereich liegt, sind die Ge-

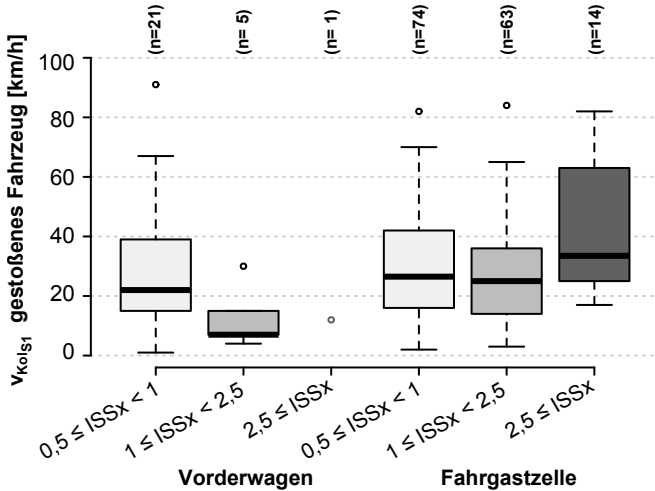


**Abbildung 3.18:** Verteilung der Unfallschwere des gestoßenen Fahrzeugs in Abhängigkeit seiner eigenen Geschwindigkeitsänderung in der Kollision  $\Delta v_{S1}$  sowie der Trefferlage. Die Unfallschwere ist in drei Gruppen ( $0,5 \leq ISSx < 1$ ,  $1 \leq ISSx < 2,5$  und  $2,5 \leq ISSx$ ) eingeteilt und jeweils für den Bereich des Vorderwagens und der Fahrgastzelle angegeben. Für die Fahrgastzelle ergibt der Kruskal-Wallis Test (Chi-Quadrat Approximation) eine Signifikanz von  $p = 0,053$ .

schwindigkeiten des Stoßenden deutlich höher. Dies ist insbesondere für die Auswahl der Sensorik von Interesse, da bei höheren Geschwindigkeiten des Stoßenden – unter idealen Bedingungen – die benötigten Öffnungswinkel kleiner sind. Im Bereich des Vorderwagens ist dieser Unterschied noch erheblich stärker ausgeprägt. Möglich wäre, dass dieser Effekt aufgrund der in den fließenden Straßenverkehr einfahrenden Fahrzeuge, die am Vorderwagen getroffen werden, verstärkt wird.

Dadurch wird offensichtlich, dass dem stoßenden Fahrzeug eine große Bedeutung bezogen auf die Verletzungsschwere zukommt. Eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit um ca. 15 km/h verschiebt das Verletzungsrisiko um eine Gruppe. Damit bestätigt die Unfallanalyse die Annahmen der Ex-

pertenschätzung für die Risikokurven aus Abschnitt 3.1.2. Treffer im Bereich der Fahrgastzelle sind zudem schon bei geringerer Geschwindigkeit mit einem erhöhten Verletzungsrisiko verbunden, im Vergleich zu Trefferlagen, die außerhalb der Fahrgastzelle liegen.



**Abbildung 3.19:** Verteilung der Unfallschwere des gestoßenen Fahrzeugs in Abhängigkeit seiner eigenen Kollisionsgeschwindigkeit  $v_{Kols1}$  sowie der Trefferlage. Die Unfallschwere ist in drei Gruppen ( $0,5 \leq ISSx < 1$ ,  $1 \leq ISSx < 2,5$  und  $2,5 \leq ISSx$ ) eingeteilt und jeweils für den Bereich des Vorderwagens und der Fahrgastzelle angegeben. Für die Fahrgastzelle ergibt der Kruskal-Wallis Test (Chi-Quadrat Approximation) eine Signifikanz von  $p = 0,00765$ .

**Anforderung 5 (Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit)** Die Verletzungsschwere der Insassen beider Fahrzeuge wird durch die Kollisionsgeschwindigkeit beeinflusst. Zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr sollte die Kollisionsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs reduziert werden.

Um den Effekt der unterschiedlichen Intrusion in Abhängigkeit der Trefferlagen bildlich zu verdeutlichen, sind in Abbildung 3.20 drei Musterfälle, die

jeweils beide Fahrzeuge zeigen, dargestellt. Deutlich wird der Unterschied in den zur Deformation zur Verfügung stehenden Fahrzeugbereichen. Ziel dieses etwas plakativen Vergleichs ist es zu verdeutlichen, welchen Einfluss die steifen Achsen haben und wie klein der zur Verfügung stehende Raum zum Energieabbau am gestoßenen Fahrzeug ist.



**Vorderwagen**



**Fahrgastzelle**



**Hinterwagen**



**Abbildung 3.20:** Unfallbeispiele für die Trefferlagen im Vorderwagen, Fahrgastzelle und Hinterwagen. Links ist jeweils das stoßende Fahrzeug, rechts das gestoßene Fahrzeug dargestellt.

### 3.3 Potenzialabschätzung im Querverkehr

Das (gesamte) Wirkfeld beschreibt die maximale Menge an adressierbaren Unfällen. Die Potenzialabschätzung gibt an, welche Verbesserung für das adressierte Wirkfeld erreicht werden kann. Diese, auch als Effizienz bezeichnete, Größe besteht zum einen aus der Menge der Unfälle, in denen das System auslöst sowie der Effektivität der Eingriffe. Voraussetzung für das Erreichen dieses Potenzials ist die spätere Ausstattungsrate und die Entwicklung des Gesamtverkehrs. IIHS (2012) gibt die Dauer, bis 95 % der Fahrzeuge über ein Assistenzsystem verfügen, mit durchschnittlich 30 Jahren an. Eine Potenzialabschätzung anhand heutiger Unfalldaten kann daher nur Anhaltspunkte liefern, wie sich ein Systemnutzen im Feld einstellen könnte.<sup>53</sup>

Neben der statistischen Prognose lassen sich rekonstruierte Unfälle in der Simulation nachrechnen, um einen Nutzen für eine bestimmte Funktion zu zeigen. Beim erneuten Durchlaufen kann eine vereinfachte Funktion bei jedem Simulationsschritt eine Auslösung prüfen, deren Folgen wiederum in nachfolgenden Schritten berechnet werden.<sup>54</sup>

Beide Ansätze lösen das Problem der Veränderung des Verkehrsumfelds nicht. Dafür muss die Gesamtverkehrsentwicklung prognostiziert werden, um für die angenommenen adressierbaren Unfälle und die erwartete Effektivität ein Potenzial auszuweisen. Dabei müssen eine Reihe an Faktoren und ihre jeweilige Entwicklung berücksichtigt werden.<sup>55</sup> Gleichzeitig müssen die bisher eingeführten Systeme und deren noch ansteigende Verbreitung als ein Beitrag zur Verkehrssicherheit angesehen werden. Maier et al. (2012) nutzen beispielsweise eine Trendanalyse, um die zukünftige Höhe der Einflussfaktoren aus ihrer Entwicklung in der Vergangenheit herzuleiten. Bisherige und zukünftige Systeme vermengen sich dadurch und tragen zu einem Erhalt oder einer Veränderung der Trendlinie bei. Diese Verfahren sind daher prinzipbe-

---

<sup>53</sup>Vergleiche beispielsweise Kullgren (2008) zum Notbremsen im Längsverkehr. Die dort angewandte Methodik wird erstmals in Kullgren (1998) vorgestellt.

<sup>54</sup>Problematisch ist dieser Ansatz insbesondere für Systeme, die eine bestimmte Fahrerreaktion erwarten. Diese lässt sich nur als weiteres Modell vereinfacht annehmen und führt dadurch zu einem weiteren Verlust von Genauigkeit (systematische Abweichung).

<sup>55</sup>Beispielsweise Fahrleistung und Unfallrisiko. Vergleiche Maier et al. (2012, Abschnitt 1.3.1) für eine ausführliche Beschreibung der Einflussfaktoren.

dingt zu ungenau, um ein einzelnes System zu evaluieren und eher geeignet, einen Gesamttrend in die Zukunft abzubilden.

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich das Wirkfeld durch Abwägung unterschiedlicher Designentscheidungen beim Systementwurf verändert. In Abschnitt 3.3.1 werden die Einschränkungen durch die maschinelle Wahrnehmung diskutiert. Fahrdynamische Einschränkungen werden in Abschnitt 3.3.2 betrachtet. In dieser Arbeit werden keine festen Warn- und Eingriffszeitpunkte definiert. Das Zusammenspiel des Systems mit dem Fahrzeugführer wird kurz in Abschnitt 3.3.3 besprochen, um den Aspekt der Lenkradddrehung im Falle eines Eingriffs näher vorzustellen. Die resultierende Effizienz ist abhängig von konkreten Realisierungsdetails. Die Simulation der Effizienz wird daher erst in Kapitel 6 für das detaillierte Handlungskonzept und die prototypische Umsetzung vorgestellt.

#### 3.3.1 Sensorisch erkennbare Unfälle

Abschnitt 3.2 beschreibt alle Querverkehrsunfälle unabhängig davon, ob eine Umfeldwahrnehmung jede Situation rechtzeitig erkennt und richtig interpretiert. Durch die maschinelle Wahrnehmung ergibt sich eine deutliche Einschränkung gegenüber diesem Maximum. Zur Verfügung stehen heute radar-, lidar- und videobasierte Verfahren. Je nach Ausführung unterscheiden sich die dafür verwendeten Sensoren grundsätzlich bezüglich Reichweite, Öffnungswinkel, Auflösung, Richtigkeit und Präzision der Messung. Zusätzlich unterscheiden sich die Systeme hinsichtlich der erkennbaren Objekte und bezüglich der Einschränkungen durch äußere Einflüsse, wie beispielsweise veränderte Licht- und Wetterbedingungen.<sup>56</sup>

#### Fahrgastzellenerkennung

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, leitet sich der größte Nutzen des Systems aus der Vermeidung von Kollisionen mit der Fahrgastzelle ab. Es stehen drei prinzipielle Möglichkeiten zur Bestimmung der Fahrgastzelle zur Verfügung:

---

<sup>56</sup>Vergleiche beispielsweise Winner et al. (2012, Kapitel 12 - 15) für eine Einführung in unterschiedliche Verfahren zur maschinellen Wahrnehmung.

### **1. C2C Kommunikation fusioniert mit bordautonomer Sensorik**

Das gestoßene Fahrzeug übermittelt per C2C Kommunikation seine eigene Position und die Position der Fahrgastzelle.<sup>57</sup> Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass auch Informationen über die Sitzbelegung sowie die Fahrerhandlung mit übermittelt werden können. Neben diesen, mit Bordsensorik nur sehr schwer zu bestimmenden Eigenschaften, lassen sich außerdem größere Reichweiten und eine Detektion trotz direkter Sichtbehinderung realisieren.<sup>58</sup>

Eine C2C basierte Lösung kann, vorausgesetzt die Nachrichten kommen rechtzeitig an und können entsprechend plausibilisiert und zugeordnet werden, das gesamte Wirkfeld abdecken und stellt damit die umfassendste Lösung dar. Allerdings ist es erforderlich, dass jedes gestoßene Fahrzeug ein solches System hat und Nachrichten sendet. Franke (2014) stellt mit „CarMatching“ ein Verfahren vor, das C2C Botschaften mit bordautonomer Sensorik fusioniert. Sein Ziel ist es die Leistungsfähigkeit von Sicherheits- und Assistenzfunktionen zu erhöhen. Dazu beitragen sollen insbesondere die schnellere Plausibilisierung von Objekten, eine höhere Positionsgenauigkeit sowie eine verbesserte Klassifikation von Objekten. Problematisch ist bei allen C2C basierten Ansätzen, dass für die Position der C2C-Objekte geeignete Integritätsmodule für Satellitennavigationssysteme<sup>59</sup> fehlen (Franke 2014, Kapitel 10). Die Präzision dieser Ansätze hängt daher von der Verfügbarkeit und Integrität der (hochgenauen) Ortung ab. Insbesondere im urbanen Umfeld wird zurzeit noch intensiv an der Verbesserung der Eigenlokalisierung geforscht. Bis zu einer entsprechend hohen Marktdurchdringung sind daher Lösungen, die nur auf der Bordsensorik des stoßenden Fahrzeugs basieren, notwendig, um die Funktion umzusetzen.

### **2. Längenschätzung mit bordautonomer Sensorik**

Eine untersuchte Möglichkeit zur Fahrgastzellenschätzung basiert auf dem Gedanken, dass die Fahrgastzellenlänge und -position möglicherweise in ei-

---

<sup>57</sup>Eine Aufnahme dieser Informationen (PositionA-Säule, PositionB-Säule, PositionC-Säule, PositionD-Säule, PositionSchwerpunkt, RadstandFahrzeug, PositionInsassen) in die ETSI Standards für CAM-Nachrichten wurde im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagen, ist jedoch erst für eine zukünftige Überarbeitung geplant.

<sup>58</sup>Problematisch sind jedoch Reflexionen, Überlagerungen und Störungen der gesendeten Nachrichten.

<sup>59</sup>Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

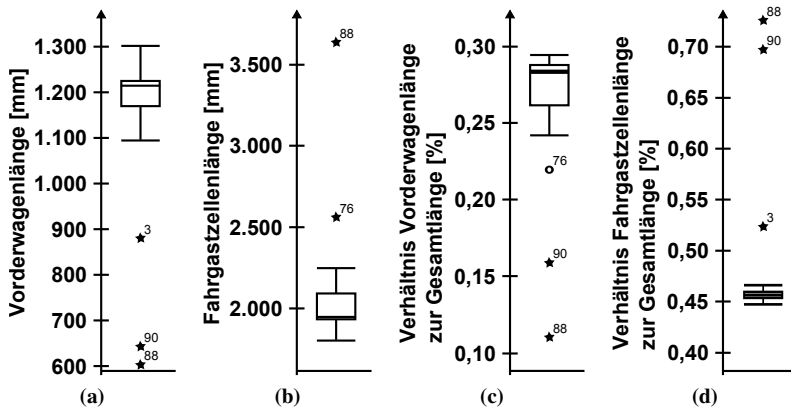
nem festen Verhältnis zur Fahrzeuggesamtlänge steht. Abbildung 3.21a zeigt die absolute Vorderwagenlänge in der Zulassungsstatistik. Deutlich ist eine geringe Standardabweichung von ca. 12 % (96 mm). Abbildung 3.21b zeigt die absolute Fahrgastzellenlänge. Auch bei dieser ist die Standardabweichung im Bereich von 9 % (221 mm) gering. Problematisch sind dabei die extremen Ausreißer nach unten und oben.<sup>60</sup> Dadurch ist eine Schätzung durch die Mittelwerte ungeeignet. Nimmt man den höchsten Wert der Vorderwagenlänge (1300 mm) als Worst-Case an und kombiniert ihn mit dem 95 % Perzentil der Fahrgastzellenlänge (2050 mm), kann man für ein generisches Fahrzeug einen Worst-Case zur Fahrgastzellenabschätzung vornehmen. Durch die extremen Unterschiede im Vorderwagen liegt die geschätzte Fahrgastzelle damit tendenziell zu weit hinten und ist in Extremfällen zu kurz geschätzt. Abbildung 3.21c und Abbildung 3.21d stellen die beiden Bereichslängen ins Verhältnis zur Gesamtlänge des jeweiligen Fahrzeugs. Damit verändern sich die Standardabweichungen der relativen Längen nur unwesentlich von denen mit absoluter Länge (ca. 10,3 % für die Vorderwagenlänge und ca. 15 % für die Fahrgastzelle). Problematisch bleiben weiterhin Sportwagen (Panamera, 911) und obere Mittelklasse (E-Klasse) sowie Vans (Sharan, Vito), die jeweils nur einen kleinen Anteil, diesen aber dafür mit signifikant abweichenden Abmessungen darstellen. Kritisch ist daher, dass bei dieser Berechnungsweise die Fahrgastzelle künstlich vergrößert wird und kein steifes Strukturelement im Hinterwagen identifiziert werden kann. Ein Handlungskonzept bliebe damit auf die Fälle beschränkt, in denen die geschätzte Fahrgastzelle unvermeidbar getroffen wird und ein Eingriff zu einer Unfallvermeidung führt oder zu einer Kollisionsgeschwindigkeit, für die ein Hinterwagentreffer (auch in nicht strukturversteiften Punkten) akzeptabel ist. Eine gezielte Verschiebung auf TL 10 ist damit nicht möglich.

### 3. Raderkennung mit bordautonomer Sensorik

Da die Detektion der Fahrzeuglänge unzureichend ist, um die Position der Fahrgastzelle zu ermitteln, wurde eine Radstanderkennung entwickelt und getestet. Die in Abschnitt 1.1.3 eingeführte Definition der Fahrgastzelle durch die beiden Fahrzeugachsen ist gut geeignet zur Erkennung über die Räder.

---

<sup>60</sup>Im Bereich des Vorderwagens Porsche Panamera (605 mm) Opel Astra (1300 mm) bzw. im Bereich der Fahrgastzelle Volkswagen Polo (1755 mm) und Porsche Panamera (3640 mm).



**Abbildung 3.21:** Länge des Vorderwagens und der Fahrgastzelle, (a) und (b) absolute Angabe, (c) und (d) relativ zur jeweiligen Fahrzeuglänge. Ausreißer sind: Volkswagen up! (3), Mercedes Vito (76), Porsche Panamera (88) und Porsche 911 (90). Angaben der häufigsten Neuzulassungen in 2011 (n = 106) nach KBA (2011)

Fahrzeugräder sind ein signifikantes Merkmal für die Bildverarbeitung, das gut erkannt werden kann (Sychrovský et al. 2013a).<sup>61</sup>

Da der Radstand mit der Fahrgastzellenlänge korreliert, ist diese damit von außen über bildgebende Verfahren eindeutig bestimmbar. Zusätzlich erlaubt dieses Verfahren, neben der Schätzung der Fahrgastzelle, noch eine grobe Klassifikation der Objekte und damit eine zuverlässige Erkennung von Pkw-Pkw Kollisionen, da Lkw beispielsweise eine größere Anzahl von Achsen haben.<sup>62</sup>

<sup>61</sup> Insbesondere in der Fusion mit einem weiteren Sensor, um die Entfernung und Geschwindigkeit des Objekts zu plausibilisieren (z.B. Radar), erscheint dieser Ansatz vielversprechend. Vergleiche Sychrovský et al. (2013b;a) für Einführung in den Stand der Technik, eine detaillierte Beschreibung der Umsetzung und den Ergebnissen des Echtzeitverfahrens.

<sup>62</sup> Für Lkw würde sich damit möglicherweise das Problem des Unterfahrens der Anhänger adressieren lassen. Vergleiche beispielsweise Braver et al. (1998) und Brähler & Rhein (2013, Abschnitt 4.6).

**Anforderung 6 (Detektion der Fahrgastzelle)** *Die maschinelle Wahrnehmung muss die Fahrgastzelle und die Position der Achsen für querende Objekte bestimmen können.*

Der heutige Stand der Technik erlaubt je nach verwendeter Sensorik und Modellbildung eine Schätzung der Objektabmessungen. Eine Klassifikation der Objekte ist in bisherigen Systemen entweder gar nicht vorhanden oder für die Unterscheidung von Fußgängern vorgesehen. Ansätze zur Erkennung der Fahrgastzelle sind bisher noch Forschungsprojekte. Prinzipiell ist die Detektion von querendem Verkehr auch möglich, ohne diese Objekte bezüglich ihrer Abmessungen zu bestimmen (z.B. mit Radar). Nachteilig daran ist, dass man gezwungen ist eine Hypothese bezüglich der räumlichen Ausdehnung zu verwenden. Diese Hypothese erhöht die Unsicherheit insbesondere bei der Kritikalitätsberechnung und Bestimmung der Fahrgastzellenposition im Vergleich zur Längenschätzung (s.o.) zusätzlich.

#### **Wetter- und Lichtverhältnisse**

Die Wetter- und Lichtverhältnisse der untersuchten Unfälle der GIDAS Datenbank sind in Tabelle 3.2 angegeben.<sup>63</sup> Deutlich wird, dass die meisten Unfälle (ca. 60 %) bei Tageslicht und bei normalen Straßenverhältnissen stattfinden. Das Wirkfeld reduziert sich entsprechend der Angabe in der Tabelle, falls die maschinelle Wahrnehmung durch die Verhältnisse nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung steht. Eine genaue Abschätzung kann erst anhand von Messreihen mit dem final verwendeten Sensor getätigt werden.

#### **Öffnungswinkel und Reichweite**

Der benötigte Öffnungswinkel ( $\phi$ )<sup>64</sup> ergibt sich aus dem Abstand der beiden Fahrzeuge zum geforderten Zeitpunkt der Erkennung (TTC). Der Öffnungs-

---

<sup>63</sup> Ob diese Größen repräsentativ die Witterungsverhältnisse im Feld abdecken, kann nicht mit Sicherheit belegt werden. Aufgrund der Erhebungsmethodik mit einem Erhebungsteam pro Standort (Hautzinger et al. 2005) ist nicht davon auszugehen, dass bei einer Häufung der Unfälle in kurzen Zeiträumen, beispielsweise bei Blitzes oder plötzlichem Platzregen, alle Unfälle vor Räumung der Unfallstellen erfasst werden.

<sup>64</sup> Der verdoppelte Wert ( $\phi \cdot 2$ ) ergibt den Gesamtöffnungswinkel des Sensors.

**Tabelle 3.2:** Verteilung der eindeutig kodierten Tageszeit und Niederschlagsverhältnisse der untersuchten GIDAS Unfälle (n = 286)

Niederschlagsart	Tageszeit		
	Tag	Nacht	Dämmerung
Kein Niederschlag	60 %	19 %	6 %
Regen	4 %	5 %	1 %
Hagel, Schnee, Eisregen	2 %	2 %	1 %

winkel wird dabei durch die Ausgangsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge  $v_{0_{sl}}$  und  $v_{0_{sz}}$ , die anfängliche Trefferlage, die Länge des querenden Fahrzeugs<sup>65</sup> und den Verbauort der Sensorik am stoßenden Fahrzeug bestimmt.<sup>66</sup> Zusätzlich müssen die Erfassungs- und Zykluszeit des Sensors sowie die Verarbeitungszeit zur Interpretation berücksichtigt werden. Geht man von einem festen Verbauort und einer durchschnittlichen Fahrzeuglänge von 4406 mm für das querende Fahrzeug aus (95 % Perzentil aller Fahrzeuglängen), sind nur die Trefferlage und die Geschwindigkeit veränderliche Faktoren, die den Öffnungswinkel und die benötigte Reichweite bestimmen. Im Folgenden soll da-

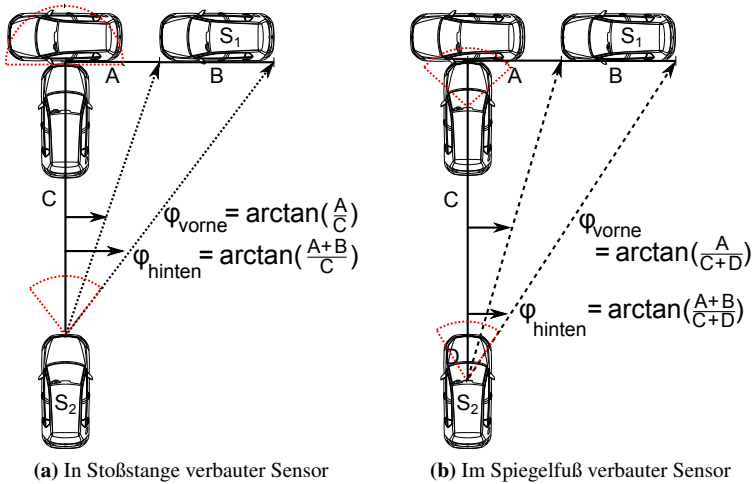
---

<sup>65</sup>Um nur die Fahrgastzelle (z.B. anhand der Räder) zu erkennen, ist der benötigte Öffnungswinkel etwas kleiner, da sich Vorder- und Hinterwagen nicht komplett im Sichtbereich befinden müssen. Alle Rechenbeispiele im Folgenden werden trotzdem mit der kompletten Fahrzeuglänge angegeben.

<sup>66</sup>Problematisch sind Gespanne aus Pkw+Anhänger. Je nach Sensor und Anhängerbauart und -länge werden diese als gemeinsames oder einzelnes Objekt mit dem Zugfahrzeug erkannt. Im Worst-Case werden sie gar nicht erkannt oder befinden sich noch nicht im Sichtbereich. Zugfahrzeuge mit Anhänger werden im Folgenden nicht betrachtet, stellen für die maschinelle Wahrnehmung und Kritikalitätsberechnung aber einen wichtigen Sonderfall dar. Für das hier vorgestellte Handlungskonzept hat das Nichterkennen insofern keinen Nachteil, als dass ein Eingriff zur Unfallfolgenminderung in Richtung TL 10 auch mit Anhänger als vorteilhaft bezüglich der Unfallschwere aller am Unfall Beteiligten beurteilt wird. Allerdings liegt der Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit der Kollision früher als vom System errechnet. Der automatische Eingriff wird daher erst später eingeleitet als es möglich wäre. Für die Zukunft sollte zudem untersucht werden, ob eine Trefferlagenänderung auf die Achse des Anhängers (analog zum Lkw) nicht gegebenenfalls auch für die Kombination Pkw + Anhänger möglich ist.



her zunächst der Einfluss der Geschwindigkeit, der TTC, der Trefferlage und anschließend der Einfluss von Länge und Verbauort erläutert werden.



**Abbildung 3.22:** Berechnung des benötigten Öffnungswinkels jeweils für Front und Heck des zu detektierenden Fahrzeugs. A: Länge Mittelpunkt ( $S_2$ ) zur Fahrzeugfront ( $S_1$ ), B: Fahrzeuglängen ( $S_1$ ), C: Entfernung zwischen den Fahrzeugen, D: Sensorversatz von Fahrzeugfront ( $S_2$ ), Gesamtöffnungswinkel (rot gestrichelt)

Die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge  $v_{0_{S1}}$  und  $v_{0_{S2}}$  bestimmen für eine  $TTC \gg 0$  jeweils den wesentlichen X- und Y-Anteil (in Fahrzeugkoordinaten) der Öffnungswinkel und Reichweite. Dabei ist relevant, welcher Teil des Fahrzeugs im Erfassungsbereich des Sensors liegen soll. Aus der TTC ergibt sich über  $v_{0_{S2}}$  der longitudinale Abstand (C) zum gestoßenen Fahrzeug in Abbildung 3.22. Der laterale Abstand (A) ergibt sich analog aus  $v_{0_{S1}}$ . Abbildung 3.22a zeigt die Berechnung des Öffnungswinkels jeweils bis zur Vorderkante ( $\phi_{\text{vorne}}$ ) und Hinterkante ( $\phi_{\text{hinten}}$ ) des querenden Fahrzeugs. Ihr Größenunterschied hängt von der Fahrzeuglänge (B) ab. Wenn die Fahrzeuge nur Punkte wären, die sich mit konstanter Geschwindigkeit aufeinander zu bewegten, würde gemäß dem Strahlensatz der Öffnungswinkel gleich blei-

ben. Der Öffnungswinkel wird jedoch durch die Fahrzeuglänge mitbestimmt. Zusätzlich beeinflusst der Verbauort des Sensors den Öffnungswinkel. Abbildung 3.22b zeigt den Unterschied, wenn der Sensor um einen Abstand (D) von ca. 1,6 m nach hinten bewegt wird. In der Ursprungslage beträgt der Gesamtöffnungswinkelunterschied zwischen Abbildung 3.22a und Abbildung 3.22b 9°. Zum Zeitpunkt der Kollision beträgt diese Differenz 85°, da der Sensor im Kühlergrill nunmehr 180° Öffnungswinkel benötigt, um das Fahrzeug komplett zu erfassen.

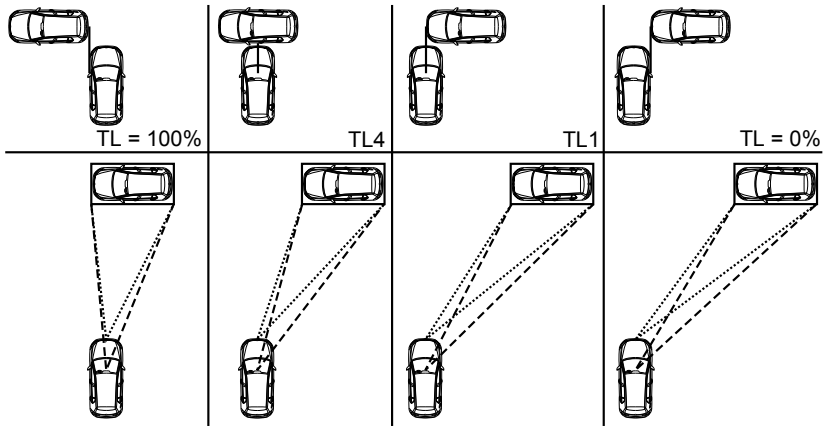
Der benötigte Öffnungswinkel sinkt, wenn entweder die Ausgangsgeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs kleiner oder die des stoßenden Fahrzeugs größer wird ( $v_{0s1} < v_{0s2}$ ), da folglich der laterale Versatz (A) zwischen den Fahrzeugen bei gleicher TTC geringer ist. Umgekehrt steigt der benötigte Öffnungswinkel, wenn entweder das gestoßene Fahrzeug schneller oder das stoßende Fahrzeug langsamer wird ( $v_{0s1} > v_{0s2}$ ). Auch die Fahrzeuglänge beeinflusst damit den Öffnungswinkel, allerdings nur in einem untergeordneten Maße im Vergleich zur Geschwindigkeit.<sup>67</sup>

Abbildung 3.23 zeigt vier mögliche Trefferlagen im oberen Bildteil. Unter der Annahme gleicher Geschwindigkeiten  $v_{0s1} = v_{0s2}$  ergibt sich für eine feste TTC eine jeweils unterschiedliche Ausgangsposition, dargestellt im unteren Bildteil. Deutlich wird, dass der benötigte Öffnungswinkel größer wird je weiter die Trefferlage im vorderen Teil des gestoßenen Fahrzeugs liegt. Der Öffnungswinkel ist daher maximal für TL = 0 % und minimal für TL = 100 %. Bei einem Eingriff, der die Trefferlage weiter nach hinten verschiebt, sinkt daher der benötigte Öffnungswinkel während des Eingriffs. Für jeden Fall ist der benötigte Öffnungswinkel für einen in der Fahrzeugfront und einen hinter der Windschutzscheibe montierten Sensor angegeben. Analog wäre es auch möglich den Sensor zu einer Fahrzeugseite zu verschieben, um die Detektion für eine querende Verkehrsrichtung zu verbessern. Da gemäß Abbildung 3.14 die Seitenverteilung annähernd gleich ist und sich auch die Geschwindigkeiten der gestoßenen Fahrzeuge nicht zwischen den beiden Seiten unterscheiden, bringt dies keine Effizienzverbesserung.<sup>68</sup>

---

<sup>67</sup>Kürzestes Fahrzeug 3429 mm, 95 % Perzentil Fahrzeug 4406 mm, längstes Fahrzeug 5079 mm nach KBA (2011).

<sup>68</sup>Denkbar sind zwei Sensoren, wobei dann je nach Überschneidung und Abstand eine Fusion stattfinden muss.

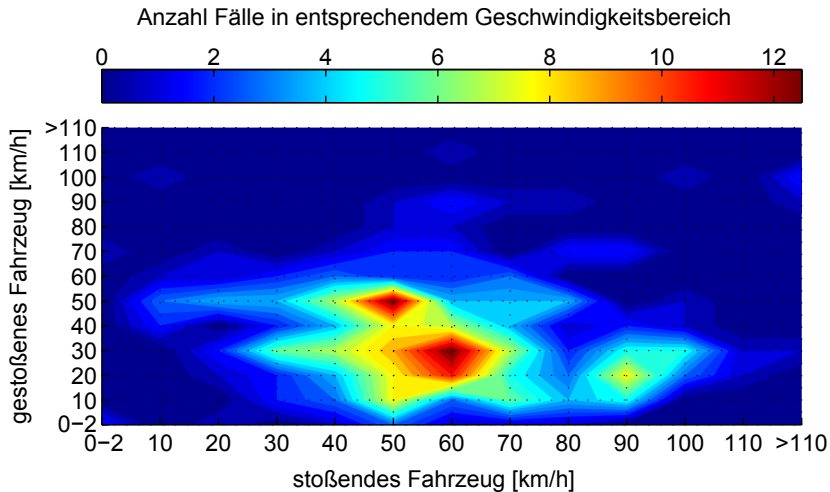


**Abbildung 3.23:** Einfluss der Trefferlage auf den benötigten Öffnungswinkel zur vollständigen Erfassung eines querenden Fahrzeugs

Die Erfassungs- und Verarbeitungszeiten der maschinellen Wahrnehmung müssen zusätzlich berücksichtigt werden. Im Worst-Case hat ein Sensor direkt eine Messung durchgeführt, bevor sich das Fahrzeug komplett im Sichtbereich befindet. Es muss daher bis zum nächsten Messzyklus gewartet werden, bevor das Fahrzeug Teil der Messung wird. Diese Messung muss entsprechend auf Steuergeräten verarbeitet werden, bevor sie als Objekt für die Situationsinterpretation bereitsteht. Je nach Art und Laufzeit der Situationsinterpretation steht diese dann als Eingangsgröße für eine Funktion zur Verfügung. Zwischen den einzelnen Schritten ergeben sich durch Übertragungen sowie zeitliche Synchronisierung der Geräte und Funktionen weitere Latenzen. Sind diese messbar oder bekannt, können die 'alten' Messdaten, beispielsweise am Eingang der Funktion, auf die aktuelle Zeit prädiiziert werden.<sup>69</sup> Wichtig ist dabei die Anzahl der benötigten gültigen Messungen, bis ein Objekt erkannt wird oder seine Beschleunigung ändert. Im Falle des hier

<sup>69</sup> Dabei entstehen Unsicherheiten durch die Bestimmung der tatsächlich vergangenen Zeit sowie durch die Annahmen über die Objekte, beispielsweise gleichbleibende Beschleunigung, obwohl das Fahrzeug anfängt zu verzögern.

vorgestellten Prototypen betrugen die Latenzen von Aufnahme bis zur fertigen Übermittlung einer Objektliste an den Funktionsrechner 90 ms bei einer Zykluszeit von 39 ms. Um den Worst-Case abzudecken, müssen die Reichweite und der Öffnungswinkel also so gewählt werden, dass schon bei einer um 129 ms erhöhten TTC das Fahrzeug im Erfassungsbereich des Sensors ist.<sup>70</sup>



**Abbildung 3.24:** Ausgangsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge vor der Kollision (n=258)

Abbildung 3.24 stellt die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge vor Kollision aus Anhang Tabelle A.2 und ihren relativen Anteilen am Unfallgeschehen dar. Tabelle 3.3 stellt in Abhängigkeit der TTC beispielhaft das

<sup>70</sup>Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass der Sensor in den Randbereichen des Öffnungswinkels eine ausreichende Auflösung aufweist, um eine erfolgreiche Messung durchzuführen. Bei der verwendeten Kamera (190° Gesamtöffnungswinkel) konnte zur Detektion der Räder nur ein Bereich von ca. 100° verwendet werden, da die Auflösung (Pixel/°) im Randbereich nicht mehr ausreichend war, um ein Rad auf die mindestens benötigten 25 x 29 Pixel Bildfläche zu projizieren.

**Tabelle 3.3:** Wirkfeld im Sichtbereich der Sensorik, in Abhängigkeit der TTC, des Sensoröffnungswinkels und der maximalen Reichweite. Für die Berechnung wurde von einem Sensor im Kühlergrill ( $D = 0,1$  m), einer Fahrzeugbreite von 1,91 m und einer Fahrzeuglänge ( $B$ ) von 4,4 m ausgegangen sowie der Worst-Case bezüglich der Abstände angenommen (vergleiche Abbildung 3.23, Fall: 0 %).

	100° 20 m	100° 40 m	100° 60 m	120° 60 m	140° 60 m	160° 60 m
500 ms	11,5 %	15,0 %	15,0 %	39,5 %	67,6 %	98,0 %
1000 ms	26,5 %	30,0 %	30,0 %	52,6 %	74,4 %	100 %
1500 ms	30,4 %	34,0 %	34,0 %	54,5 %	77,9 %	100 %
2000 ms	33,6 %	37,2 %	37,2 %	59,7 %	79,8 %	100 %

adressierbare Wirkfeld in Abhängigkeit der Gesamtöffnungswinkel und maximaler Reichweite kumuliert dar.<sup>71</sup> Für kleinere TTCs sinkt das Wirkfeld für Sensoren mit einem Gesamtöffnungswinkel  $< 180^\circ$ , da nicht mehr das gesamte Fahrzeug im Erfassungsbereich liegt. Um dennoch die Trefferlage zu bestimmen, können beispielsweise einzelne Merkmale am querenden Objekt, die noch im Bildbereich liegen, verfolgt werden. Für das Handlungskonzept ist es in jedem Fall notwendig berechnen zu können ob es noch zur Kollision kommt. Dafür werden die Außenabmessungen des gestoßenen Fahrzeugs, insbesondere die Fahrzeuglänge, benötigt. Die Abmessungen können entweder durch die verfügbare maschinelle Wahrnehmung direkt bestimmt, oder anhand von Annahmen und Schätzungen bestimmt werden.

**Anforderung 7 (Detektion der Fahrzeuglänge)** *Die maschinelle Wahrnehmung sollte die Fahrzeuglänge bestimmen können. Ohne Kenntnis der Fahrzeuglänge muss anhand der Fahrgastzelle eine Fahrzeuglänge geschätzt werden, um bestimmen zu können, ob ein Ausweichen möglich ist.*

<sup>71</sup>Nicht berücksichtigt sind zusätzliche Latenzen durch die Sensorik selbst und eventuelle Bildverarbeitung.

#### **Einschränkungen durch Verdeckung**

Verdeckung oder zumindest teilweise Verdeckung ist ein wesentlicher Faktor in realistischen Einsatzszenarien. Es gibt zwei Arten von Verdeckung, die für dieses System betrachtet werden müssen. Dynamische Verdeckung durch andere Verkehrsteilnehmer und statische Verdeckung durch ortsfeste (zumindest temporäre) Bebauung.

#### **Statische Verdeckung**

Die Form der Bebauung oder Bepflanzung im Kreuzungsbereich kann stark unterschiedlich sein. Die Beeinflussung durch die Verdeckung nimmt zu, je weiter diese an den Mittelpunkt der Kreuzung bzw. Fahrbahn reicht. Insbesondere in Wohngebieten gibt es teilweise nur sehr schmale oder keine Gehwege zwischen Fahrbahn und Grundstücksgrenze. Auf der Grundstücksgrenze befinden sich manchmal Bepflanzungen oder Zäune/Mauern. Im Bereich der Gehwege können sich Personen, Schilder, Container oder geparkte Fahrzeuge befinden. Auf Seitenstreifen und am Fahrbahnrand, teilweise direkt auf den Fahrstreifen, können geparkte oder haltende Fahrzeuge stehen. Damit ergibt sich eine zurzeit nicht abschätzbare Variantenvielfalt, die je nach Objektbeschaffenheit zu einer teilweisen oder kompletten Verdeckung für die im Bereich der Fahrerassistenz üblichen Sensoren (Radar, Lidar, Kamera, Ultraschall) führt. Im Folgenden soll anhand einer Worst-Case Kreuzung mit und ohne parkende Fahrzeuge gezeigt werden, welche Einschränkungen sich für ein System mit bordautonomer Sensorik ergeben und wie man diese bestmöglich adressiert.

Abbildung 3.25 zeigt eine typische Kreuzung eines in den 1970er Jahren neu erbauten Wohngebiets in der Nähe von Wolfsburg. Eingezeichnet ist eine reale Unfallsituation für zwei Ausgangssituationen.<sup>72</sup> Die beiden Fälle sollen das Problem der Verdeckung verdeutlichen. Das stoßende Fahrzeug  $S_2$  steht in direkter Verlängerung der Sichtlinie mit einem Abstand von 11,4 m zum Kollisionspunkt. Der Sensor ist mittig im Kühlergrill verbaut.<sup>73</sup>  $S_2$  hat ei-

---

<sup>72</sup>Das stoßende Fahrzeug  $S_2$  steht, entgegen dem realen Unfall, am linken Fahrbahnrand und damit ungünstiger bezogen auf die Sichtbarkeit.

<sup>73</sup>Für einen im Spiegelfuß verbauten Sensor würde  $S_2$  entsprechend 1,6 m näher am Kollisionspunkt stehen. Die resultierende TTC bei einer Geschwindigkeit von 13,3 m/s aus dem Beispiel wäre um 121 ms geringer.

ne Ausgangsgeschwindigkeit von 13,3 m/s. Daraus ergibt sich eine TTC von 857 ms bis zur Kollision.

Im 1. Fall ist das Fahrzeug  $S_1$  gerade an der Verdeckung vorbei in den Sichtbereich des Sensors gelangt. Um das komplette Fahrzeug zu erfassen, wäre daher ein Öffnungswinkel  $\phi_0$  von  $49,9^\circ$  erforderlich (rote, gepunktete Linie). Im 2. Fall ist das Fahrzeug  $S_1$  komplett an der Verdeckung vorbeigefahren. Der benötigte Öffnungswinkel  $\phi'_0$  beträgt  $36,8^\circ$ . Der Fahrer des stoßenden Fahrzeugs kann zu diesem Zeitpunkt das gestoßene Fahrzeug bis zur B-Säule sehen. Da sich im 2. Fall das stoßende Fahrzeug sehr viel näher am Kollisionspunkt befinden muss, um nicht verdeckt zu sein, ist seine Geschwindigkeit um ca. 4 m/s niedriger, um bei gleicher TTC am selben Kollisionspunkt anzukommen.<sup>74</sup>

Neben dieser beispielhaften Betrachtung kann auch der theoretische Worst-Case anhand der Straßenverkehrsordnung als Grundlage zur Anforderungsdefinition genutzt werden. Das Problem der statischen Verdeckung lässt sich, wie in Abbildung 3.26 dargestellt, daher auch theoretisch anhand zweier rechtwinkliger Dreiecke beschreiben. Dargestellt ist eine maximal zulässig zugeparkte Kreuzung.<sup>75</sup> Der 1. Fall stellt die minimale Distanz für das gestoßene Fahrzeug zum Kollisionspunkt dar. Die verdeckenden Objekte befinden sich dabei außerhalb der Fahrbahn und die beiden Fahrzeuge fahren ohne Abstand an diesen vorbei. Da der Sensor mittig verbaut ist, ergibt sich durch den Versatz (F) nach innen ein zweites Dreieck.<sup>76</sup> Je größer dieser Abstand, desto weiter weg vom Kollisionspunkt steht das stoßende Fahrzeug. Im 1. Fall (rechtwinkliges und gleichschenkliges Dreieck) ergibt sich damit:

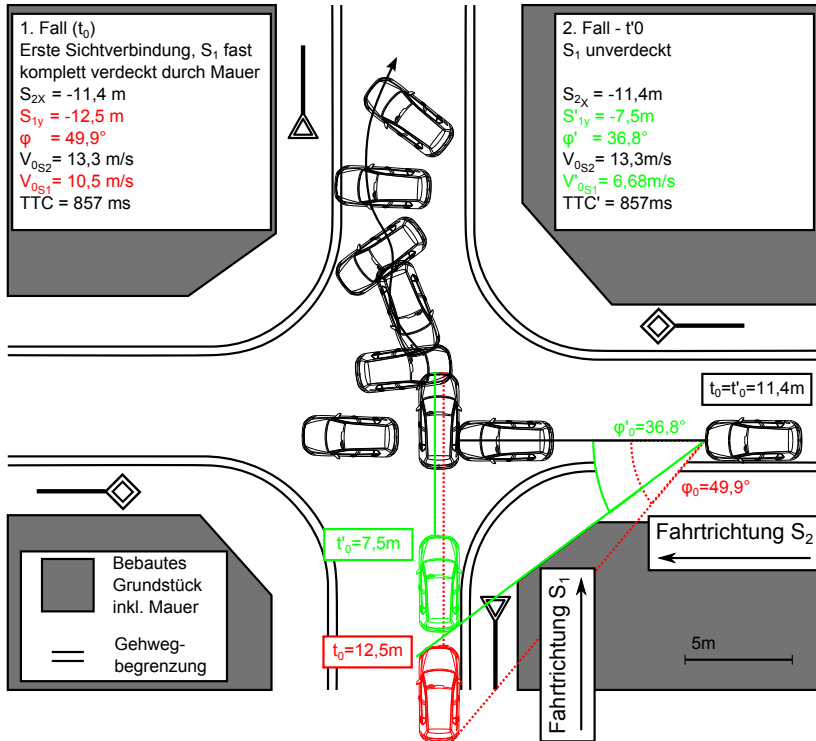
$$\phi_1 = 45^\circ$$
$$E = \frac{\tan(45^\circ)}{F} = \frac{1}{F}.$$

---

<sup>74</sup>Bei gleicher Geschwindigkeit wie im 1. Fall kommt es nicht zur Kollision.

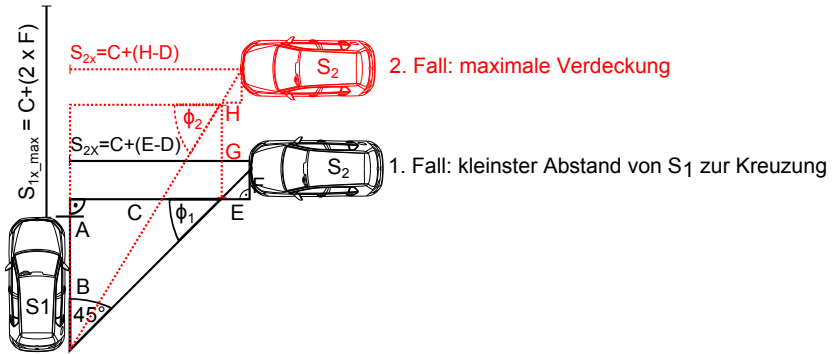
<sup>75</sup>§12 Abs. 3 StVO: „Das Parken ist unzulässig vor und hinter Kreuzungen und Einmündungen bis zu je 5 m von den Schnittpunkten der Fahrbahnkanten“.

<sup>76</sup>Nach Schuster et al. (2011, Abschnitt 2.1) betragen die Fahrzeugbreite (ohne Spiegel) für das 85 % Perzentil aller ab 2010 neu zugelassenen Fahrzeuge 1,91 m.



**Abbildung 3.25:** Unfallsituation an einer Neubau-Wohngebietskreuzung im Umfeld von Wolfsburg. Eingezeichnet sind 2 Fälle mit jeweils gleichem Abstand zum Kollisionspunkt (11,4 m) und gleicher Geschwindigkeit (13,3 m/s) des stoßenden Fahrzeugs  $S_2$ . Daraus ergibt sich die TTC von 857 ms. Das gestoßene Fahrzeug  $S_1$  ist im 1. Fall (rot, gepunktet) fast komplett verdeckt (die Stoßstange ist knapp im Sichtbereich des mittig im Kühlergrill verbauten Sensors). Aus dem Abstand zum Kollisionspunkt (12,5 m) ergibt sich die Geschwindigkeit (10,5 m/s). Im 2. Fall (grün) ist das Fahrzeug unverdeckt und komplett im Sichtbereich des Sensors. Aus dem Abstand zum Kollisionspunkt (7,5 m) ergibt sich die Geschwindigkeit (6,68 m/s). Beide Fahrzeuge sind direkt am Fahrbahnrand positioniert, um den größten Öffnungswinkel zu erhalten.





**Abbildung 3.26:** Schematische Darstellung der Sichtverhältnisse an einer bis auf 5 m zugewinkelten Kreuzung. Im 1. Fall befindet sich die Verdeckung neben der Fahrbahn, im 2. Fall (rot) ragt diese maximal weit in den Fahrstreifen. A: Abstand  $S_{1_x}$  bis zur 1. Kollisionsmöglichkeit für  $S_1$ , B: Fahrzeuglänge (A + B in Summe 5 m), C: 5 m gesetzlicher Mindestabstand zum Fahrstreifenschnittpunkt, D: Sensorversatz zur Fahrzeugfront (hier  $D=0$ ), E: Durch F resultierende Sichtwinkelverbesserung im 1. Fall, F: Sensorabstand zur Seite, ( $S_{2_x} = C + (E - D)$ ): Abstand  $S_{2_x}$  bis zur 1. Kollisionsmöglichkeit für  $S_2$  im 1. Fall (analog  $C + (H - D)$  im 2. Fall), ( $S_{1_x_{max}} = C + 2 \cdot F$ ): Abstand zur letzten Kollisionsmöglichkeit für  $S_1$ , G: Verdeckung durch ein Kühlfahrzeug (2,6 m breit) am Fahrbahnrand plus 0,5 m Sicherheitsabstand, H: Durch F resultierende Sichtwinkelverbesserung im 2. Fall

Mit der Breite eines 85 %-Perzentil Fahrzeugs nach Schuster et al. (2011, Abschnitt 2.1) von 1,91 m ergibt sich für einen mittig verbauten Sensor:

$$F = \frac{1,91\text{ m}}{2} = 0,955\text{ m}.$$

Mit dem Scheitelwinkel von  $\phi_1$  folgt über den Tangenssatz der Abstand E:

$$E = \tan(90^\circ - \phi_1) \cdot F \approx 0,955\text{ m}.$$

Der Abstand zum Kollisionspunkt  $S_{2x}$  ergibt sich aus dem Abstand  $C = 5\text{ m}$  abzüglich des schon angesprochenen Sensorversatzes  $D = 0,1\text{ m}$ :

$$S_{2x} = C + (E - D) = 5\text{ m} + (0,955\text{ m} - 0,1\text{ m}) \approx 5,855\text{ m}.$$

Das gestoßene Fahrzeug muss, ausgehend von dieser Position, im 1. Fall ca. 18 % mehr Wegstrecke ( $C + 2 \cdot F \approx 6,91\text{ m}$ ) als das stoßende Fahrzeug (in gleicher Zeit) zurücklegen, um eine Kollision zu vermeiden.

Im 2. Fall steht ein maximal zulässig<sup>77</sup> breites Fahrzeug (2,6 m) am Fahrbahnrand. Zusätzlich werden 0,5 m Sicherheitsabstand angenommen. Durch diesen als G bezeichneten Abstand ergibt sich der Öffnungswinkel  $\phi_2$  durch:

$$\frac{A + B + G}{C} = \tan(\phi_2).$$

Mit  $A + B = 5\text{ m}$  und  $G = 2,6\text{ m} + 0,5\text{ m}$  ergibt sich:

$$\arctan\left(\frac{5 + 3,1}{5}\right) \approx 58,31^\circ = \phi_2.$$

Über den Scheitelwinkel von  $\phi_2$  ergibt sich damit für den Abstand H:

$$H = \tan(90^\circ - \phi_2) \cdot F \approx 0,59\text{ m}$$

---

<sup>77</sup> §18 Abs. 1 StVO: „Fahrzeug und Ladung dürfen zusammen nicht [...] breiter als 2,55 m sein. KÜHlfahrzeuge dürfen nicht breiter als 2,60 m sein.“

und damit der etwas kürzere Abstand zum Kollisionspunkt im 2. Fall:

$$S_{2x} = C + (H - D) = 5\text{ m} + (0,59\text{ m} - 0,1\text{ m}) \approx 5,49\text{ m}.$$

Daraus ergibt sich ein Gesamtöffnungswinkel von  $90^\circ$  im 1. Fall und ca.  $120^\circ$  im 2. Fall. Über eine TTC und die Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs kann damit die minimale und maximale Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs entsprechend berechnet werden. Der beschriebene Fall geht vom Worst-Case innerhalb der gesetzlichen Vorschriften aus. Natürlich ist es denkbar, dass geparkte Fahrzeuge wesentlich weiter in die Kreuzung hineinreichen. Diese Fälle sind analog zum Worst-Case der dynamischen Verdeckung zu sehen.

#### **Dynamische Verdeckung**

An Kreuzungen mit Abbiegefahrstreifen besteht die Möglichkeit, dass dort ein großes Fahrzeug, beispielsweise ein Lkw, die gesamte Sicht bis zur Haltelinie verdeckt. In diesem Fall reduziert sich die Möglichkeit ein querendes Objekt zu detektieren. Erst auf Höhe des verdeckenden Objekts ergibt sich ein freies Sichtfeld, das einen Gesamtöffnungswinkel von mindestens  $180^\circ$  benötigt. Der Abstand bis zum Kollisionspunkt ist dabei je nach Situation beliebig niedrig. Damit sind die Fälle individuell zu verschieden, um gezielt Anforderungen abzuleiten.

Zusammenfassend ergibt sich, dass eine in der Fahrzeugfront verbaute Sensorik aufgrund baulicher Verdeckung und eng am Kreuzungsrand geparkter Fahrzeuge eine Detektion bis zu 5,49 m vor Kollision für das stoßende Fahrzeug ermöglichen sollte. Kürzere Entfernungen sind vor allem zur Verfolgung des Kollisionspunktes nach Auslösung relevant und nicht für die initiale Auslösung einer Handlung. Dynamische Hindernisse und nicht StVO gemäß abgestellte Fahrzeuge, Container etc. können eine Detektion der kreuzenden Fahrzeuge praktisch vollständig verhindern.<sup>78</sup> Bauliche Verdeckung ist im Allgemeinen trotzdem kein Hinderungsgrund für eine rechtzeitige Detektion.

---

<sup>78</sup>Diese Aussage gilt für Sensoren, die ein freies Sichtfeld benötigen. Mit C2X Sensoren könnten beispielsweise auch diese Fälle adressiert werden. Dabei stünde allerdings kein bordeigener Sensor zur Plausibilisierung der über Kommunikationswege erhaltenen Positionen zur Verfügung.

Mit steigenden Geschwindigkeiten, insbesondere in den für die hohen Verletzungsschweren relevanten Ausfallstraßen, waren alle stichprobenartig untersuchten Fälle eine Sekunde vor Kollision vollständig frei von Verdeckung.

**Anforderung 8 (Verdeckung - Öffnungswinkel)** *Um die querenden Objekte möglichst früh hinter ortsfesten Verdeckungen an Kreuzungen zu erkennen, sollte ein Gesamtöffnungswinkel von mindestens 120° für die Sensorik verwendet werden.*

**Anforderung 9 (Verdeckung - Reichweite)** *Um die querenden Objekte möglichst dicht hinter ortsfesten Verdeckungen an Kreuzungen zu erkennen, sollte bei einer Reichweite von 5,5 m noch ein Objekt erkannt werden.*

**Anforderung 10 (Verdeckung - Einbauort)** *Der Einfluss von ortsfester Verdeckung kann durch eine möglichst weit vorne liegende Einbaulage und mittig am Fahrzeug verbaute Sensorik reduziert werden.*

### 3.3.2 Fahrdynamische Betrachtungen

Zur Unfallvermeidung und -folgenminderung der oben betrachteten Unfälle ist es notwendig den Handlungsraum des Fahrzeugs zu definieren, der die Möglichkeiten eines automatischen Systemeingriffs beschreibt. Gezieltes Beschleunigen wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Eine Handlung ist daher entweder ein Brems- oder Lenkeingriff bzw. die Kombination daraus. Das fahrdynamische Verhalten eines Pkw ist in vielen Bereichen nicht linear. Es existieren eine Reihe von Modellen zur Approximation des Verhaltens in bestimmten Betriebsbereichen.<sup>79</sup> Der verwendete Ansatz und die damit erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 5.1.1 genauer beschrieben.

---

<sup>79</sup>Vergleiche beispielsweise Schorn (2006).

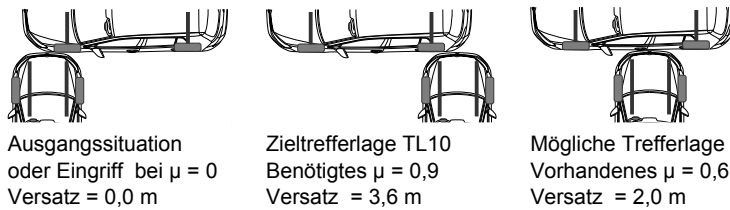
#### **Berücksichtigung des Reibwerts**

Essenziell für die Modellierung des Fahrverhaltens ist das Kraftschlusspotenzial mit der Straße. Dabei wird die maximal übertragbare Kraft durch den Reibkoeffizienten  $\mu$  begrenzt. Eine Schätzung des aktuellen Reibwerts ist damit eine zwingende Voraussetzung zur Berechnung der Trefferlagenänderung. Es existieren zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Reibwertschätzung beschäftigen. Verfahren zur Bestimmung anhand der Fahrzeugdynamik finden sich beispielsweise in Müller et al. (2001) und Ahn et al. (2012). Dabei können beispielsweise Reibwerte anhand der Verkehrsdomänen aus digitalen Karten geschätzt, Regen- und Temperatursensoren zur Abschätzung verwendet oder Messdaten aus ABS-Bremsungen anderer Fahrzeuge, die per C2C übermittelt werden, genutzt werden. Andersson et al. (2007, Abschnitt 6.1) geben eine Liste durchschnittlicher Reibwerte (insbesondere bei schlechten Straßenbedingungen) an, die als Ausgangsschätzung für die Funktion verwendet werden.

Abbildung 3.27 stellt für eine Ausgangssituation den erreichten Versatz in Bezug zum gegnerischen Fahrzeug in Abhängigkeit vom Reibwert dar. Für eine Handlung, die den zur Verfügung stehenden Reibwert überschreitet, ergibt sich ein abweichender Versatz und damit ein Positionsfehler in der Trefferlage. Durch Erhöhung der Differenz zwischen dem für die Handlung benötigten Reibwert und dem vorher geschätzten Reibwert ergibt sich zum einen eine Sicherheitsreserve, zum anderen ein eingeschränkter Handlungsraum. Der Handlungsraum wird dabei entweder in Bezug auf den erreichbaren Versatz oder zeitlich auf frühere (längere) Eingriffe mit geringeren benötigten Beschleunigungen beschränkt.

Es ergibt sich ein Dilemma zwischen früheren und dafür schwächeren Eingriffen, um Reibwertunsicherheiten zu adressieren und späteren und dafür stärkeren Eingriffen, um dem Fahrer möglichst lange die volle Kontrolle über das Fahrzeug zu lassen. Dieses Dilemma lässt sich technisch beeinflussen (z.B. durch schnelleres Bremsen, verbesserte Reibwertschätzung), aber nicht grundsätzlich lösen.

Probleme ergeben sich hierbei, wenn der Reibwert substantiell vom ursprünglichen Schätzwert abweicht. Geht das Entscheidungsverfahren beispielsweise zunächst von trockenem Asphalt mit  $\mu = 0,65$  aus und würde



**Abbildung 3.27:** Auswirkung des Reibwerts auf die Trefferlagenänderung. Links ist die Kollision ohne Eingriff bzw. für einen Eingriff mit  $\mu = 0$  dargestellt. In der Mitte ist die Zieltrefferlage dargestellt. Zum Erreichen der Zieltrefferlage wird ein Versatz von 3,6 m benötigt, der erst ab einem Reibwert von  $\mu = 0,9$  (trockener Asphalt) erreicht werden kann. Rechts ist die Auswirkung eines geringeren Reibwerts  $\mu = 0,6$  (nasser Asphalt) dargestellt. Für eine Handlung, die einen höheren Reibwert benötigt als real vorhanden ist, ergibt sich ein Versatz, der geringer als geplant ist.

dazu im Vergleich einen Fall mit Glatteis  $\mu = 0,1$  rechnen, ist praktisch keine Trefferlagenänderung durch einen Bremseneingriff möglich. Bei so hohen Differenzen kann anhand der Kennfelder erst während des Eingriffs erkannt werden, welche Verzögerungen realisierbar sind und der Eingriff abgebrochen oder angepasst werden. Baumgarten (2009); Kroll et al. (2014) beschreiben ein Verfahren, das bei Erreichen der Hälfte der realisierbaren Querschleunigung eine Schätzung des aktuellen  $\mu$  erlaubt und damit eine verbesserte Schätzung vor einem Eingriff ermöglicht. Letztlich bleibt der Worst-Case trotzdem immer bestehen, da die letzten Meter vor einer Kollision, beispielsweise durch Glatteis oder einer Ölspur, den Eingriff stark von seiner ursprünglichen Planung abändern können. Daher muss der Eingriff vor Auslösung auch für minimale Reibwerte abgesichert werden.

**Anforderung 11 (Reibwertschätzung)** *Ein von einer Schätzung abweichender Reibwert kann bei jedem Eingriff und zu jedem Zeitpunkt auftreten. Daher muss für jeden Eingriff sichergestellt werden, dass ein automatischer Eingriff für alle geringeren Reibwerte nicht zu einer Erhöhung der Verletzungsschwere für alle am Unfall beteiligten Personen führt.*

Abschnitt 4.2.3 stellt ein Verfahren vor, dass für einen Eingriff das jeweilige Risiko für alle Reibwertvarianten berechnet. Anhand dieser Ergebnisse können die entstehenden Risiken im Vergleich zum Verlauf ohne Eingriff bewertet werden.

#### **Erforderliche Positionsgenauigkeit**

Zur Beurteilung, ob die erreichte Positionsgenauigkeit genügt, muss zunächst definiert werden, welche Anforderungen an die Präzision zu stellen sind. Die als Zieltrefferlage definierte Vorderachse bzw. Hinterachse wird durch die Felgengröße bestimmt. Unter der Annahme, dass die Längsträger des stoßenden Fahrzeugs in einer Höhe mit dem Mittelpunkt der Felge liegen<sup>80</sup> und die Längsträger-Kontaktfläche ca. 150 mm breit ist, wird gefordert, dass die Längsträger-Kontaktfläche mindestens zur Hälfte im Bereich der Felge liegt. Damit vergrößert sich die Trefferzonengröße um ca. 75 mm. Tabelle 3.4 gibt die resultierende Trefferzonengröße für Felgen von 13“ bis 20“ und ihre Verteilung in der verwendeten GIDAS Stichprobe an. Basierend auf dem Median der GIDAS Felgengröße von 14“ ( $\text{Ø}14,4'' \pm 1,23''$ ) ergibt sich eine erlaubte Abweichung von ca.  $\pm 25$  cm. Die minimal festzulegende Größe muss später anhand der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge definiert werden. Vermutlich wird beim aktuellen Trend der Neuzulassungen die Felgengröße zunehmen und der Anteil der 13“ Felgen zugunsten der 15“ Felgen abnehmen.

**Anforderung 12 (Erforderliche Positionsgenauigkeit)** *Zum Erreichen der vorderen und hinteren Trefferlage muss der jeweilige Längsträger innerhalb der Felge Kontakt haben. Daraus ergibt sich eine erforderliche Gesamtgenauigkeit von  $\pm 25$  cm.*

---

<sup>80</sup>In der Realität liegen die Längsträger und daher auch die vorderen Querträger bei vielen Fahrzeugen etwas höher als der Felgenmittelpunkt. Die entstehende Abweichung wird in der Betrachtung hier vernachlässigt, da die Fahrzeugstruktur um das Ende des Längsträgers insgesamt sehr steif ausgeführt ist. Im Gegenzug wird daher als Längsträger-Kontaktfläche auch nur der reine Anschraubbereich genommen und dieser nicht um den Nahbereich (beispielsweise der Anfang des vorderen Querträgers) erweitert. Durch das Bremsnicken im Eingriffsfall kommt es zudem zu einer Absenkung des vorderen Querträgers.

**Tabelle 3.4:** Felgenreöße der gestoßenen Fahrzeuge der GIDAS Stichprobe aus Abschnitt 3.2.1 zuzüglich 75 mm, zur Beschreibung der benötigten Positionspräzision der Trefferlagenänderung (n = 258).

Felgenreöße	benötigte Präzision	Anteil in GIDAS
13“	$\pm 24,01$ cm	29,4%
14“	$\pm 25,28$ cm	22,8%
15“	$\pm 26,55$ cm	31,0%
16“	$\pm 27,82$ cm	9,7%
17“	$\pm 29,06$ cm	6,7%
größer als 17“	$\geq \pm 29,06$ cm	0,4%

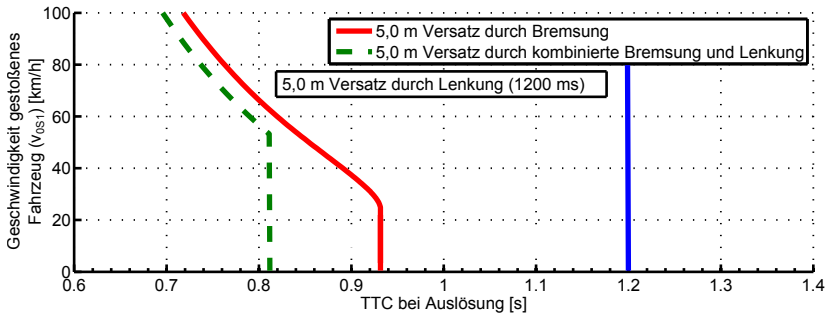
### **Eingriffszeitpunkte der Handlungen**

Dieser Abschnitt definiert keine Anforderungen bezüglich der Warn- und Eingriffszeitpunkte. Diese werden in Abhängigkeit der anvisierten Funktionalität von den Fahrzeugherstellern getroffen. Neben der erreichbaren Positionsgenauigkeit des Fahrzeugs spielen dafür weitere Einflussfaktoren eine Rolle, insbesondere die Richtigkeit der Positionsbestimmung des getroffenen Fahrzeugs sowie die auftretenden Latenzen bei der Wahrnehmung und Auslösung.

Warn- und Eingriffszeitpunkte eines Fahrerassistenzsystems hängen neben den Zielen, die eine Funktion erreichen soll, vom Zusammenspiel mit dem Fahrer ab. Ziel dieses Abschnitts es ist daher qualitativ einzuordnen welche TTC aus technischer Sicht realistisch erscheint, um eine bestimmte Trefferlagenänderung zu realisieren. Dafür werden jeweils die drei Handlungsvarianten, reine Lenkung, reine Bremsung und kombinierte Bremsung und Lenkung, verglichen. Grundlage der Berechnungen ist das Fahrzeugmodell des verwendeten Versuchsträgers aus Abschnitt 5.1.

Abbildung 3.28 zeigt den Verlauf der benötigten TTC, für die eine Unfallvermeidung durch Bremsen, Lenken oder eine Kombination möglich ist. Die dafür benötigte Trefferlagenänderung ist somit das Maximum dessen, was durch die jeweilige Handlungskombination realisierbar ist. Ausgehend von einer Trefferlage ohne Eingriff von 0 % wird der Abstand über die TTC und die jeweilige Geschwindigkeit des Gestoßenen definiert. Die Ausgangs-



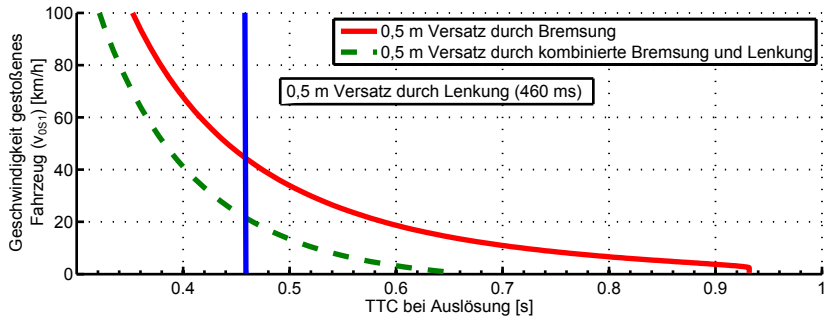


**Abbildung 3.28:** Grenze zur Unfallvermeidung bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h. Angegeben über die benötigte TTC, um eine entsprechend große Trefferlagenänderung für die verschiedenen Eingriffsmöglichkeiten zu generieren: Bremsen, Lenken oder eine Kombination. Berechnet für eine Ausgangstrefferlage ohne Eingriff von 0 % sowie eine Fahrzeuglänge des gestoßenen Fahrzeugs von 5 m und eine Fahrzeugbreite des stoßenden Fahrzeugs von 1,91 m.

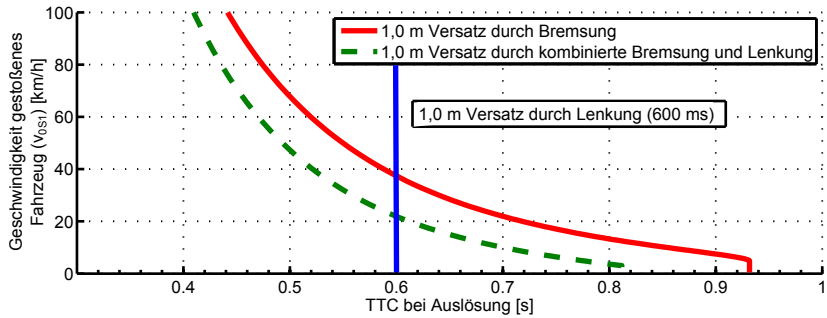
geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs beträgt 50 km/h. Die Geschwindigkeit des Gestoßenen wird als konstant angenommen. Eine Verzögerung oder Beschleunigung des gestoßenen Fahrzeugs verschiebt die Kurven entsprechend auf der Abszisse nach rechts oder links. Die Kurven geben jeweils die TTC bei Auslösung an. Durch den Eingriff verlängert sich die Zeit bis zur Kollision entsprechend, so dass die Eingriffsdauer entsprechend höher ist. Die zugrunde liegenden Beschleunigungsverläufe entstammen den verwendeten Kennfeldern des Fahrzeugs.

Für den kombinierten Eingriff wird die Priorität auf die Bremsung gelegt. Es wird nur das verbleibende Kraftschlusspotenzial zur Richtungsänderung durch die Lenkung verwendet. Der benötigte Versatz kann daher in Fällen, bei denen der benötigte Versatz im Verhältnis zur Auslösegeschwindigkeit klein<sup>81</sup> ist durch ein reines Lenkmanöver, schneller erreicht werden als durch die Kombination mit der Bremse. Eine Strategie, die die Lenkung bevorzugt und das restliche Kraftschlusspotenzial zur Verzögerung nutzt, ist nur geringfügig besser als die reine Lenkung, da sich die Verzögerung langsamer als

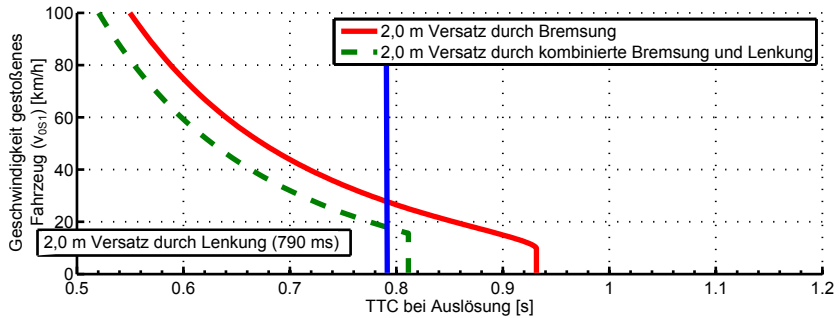
<sup>81</sup> Beispielsweise in Abbildung 3.29.



(a) 0,5 m Versatz, 50 km/h Ausgangsgeschwindigkeit

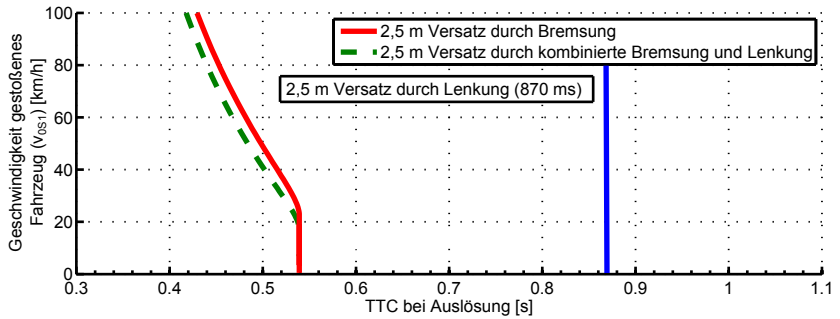


(b) 1,0 m Versatz, 50 km/h Ausgangsgeschwindigkeit

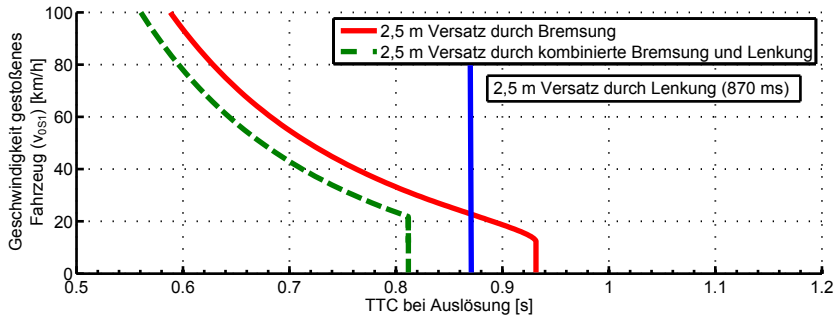


(c) 2,0 m Versatz, 50 km/h Ausgangsgeschwindigkeit

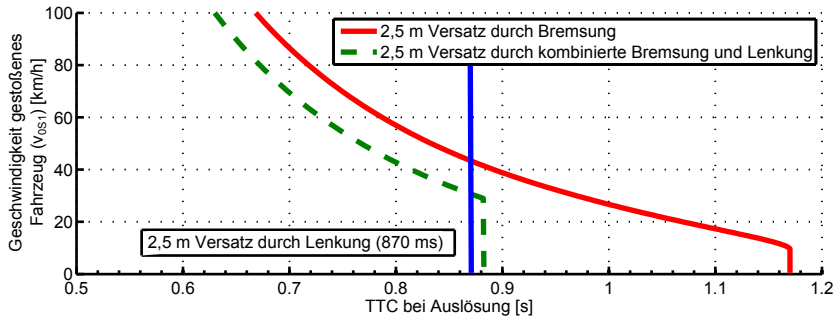
**Abbildung 3.29:** Benötigte TTC, um bei 50 km/h eine entsprechende Trefferlagenänderung zu generieren.



(a) 2,5 m Versatz, 25 km/h Ausgangsgeschwindigkeit



(b) 2,5 m Versatz, 50 km/h Ausgangsgeschwindigkeit



(c) 2,5 m Versatz, 66 km/h Ausgangsgeschwindigkeit

**Abbildung 3.30:** Benötigte TTC, um 2,5 m Trefferlagenänderung zu generieren.

die Querschleunigung aufbaut. Die Differenz zwischen dem Verlauf der Bremskurve und der kombinierten Kurve ist daher auf den schnellen Anstieg der Querschleunigung am Anfang zurückzuführen. Diese am Anfang aufgebaute Quergeschwindigkeit trägt über den Verlauf der Eingriffszeit dazu bei, dass der Versatz kontinuierlich steigt. Analog zum reinen Lenkeingriff ist diese Art der Trefferlagenänderung nicht abhängig von der Geschwindigkeit des querenden Fahrzeugs sondern nur von der Auslösezeit. Im Gegensatz dazu, hängt der durch die Bremsung aufgebaute Versatz, von der Geschwindigkeit des Gestoßenen ab. Ab maximal 937 ms und für Geschwindigkeiten  $v_{0st} < 24,2$  km/h ist der erzeugte Versatz entweder groß genug oder das Fahrzeug kommt vor dem Kollisionsort zum Stehen. Der kombinierte Eingriff erreicht bei einer Auslösezeit von ca. 811 ms den Punkt, ab dem genügend Versatz aufgebaut werden kann, um einem 5 m breiten Hindernis mit einer Geschwindigkeit von maximal 54,6 km/h auszuweichen.

Abbildung 3.29 zeigt den Einfluss des zu produzierenden Versatzes bei gleichbleibender Geschwindigkeit. Abbildung 3.30 stellt im Vergleich dazu den Einfluss der Auslösegeschwindigkeit dar. Je geringer die Auslösegeschwindigkeit, desto geringer werden der Abstand des stoßenden Fahrzeugs zum Kollisionsort und entsprechend das Potenzial durch die Lenkung. Dies wird besonders deutlich, wenn man den Unterschied zwischen Abbildung 3.30a (25 km/h) und der für die Funktion vorgesehenen maximal möglichen Auslösegeschwindigkeit von 66 km/h in Abbildung 3.30b vergleicht.

Die Trefferlagenänderung kann somit auf unterschiedliche Art und Weise erzeugt werden. Man kann die Trefferlagenänderung daher auch als eine Funktion der Handlung bezeichnen und als von der verwendeten Aktorik unabhängig ansehen. Diese Sichtweise wird in Abschnitt 3.4 und Abschnitt 3.5 wieder aufgegriffen, um die zugrunde liegenden Probleme der Trefferlagenänderung auf abstraktere Weise zu betrachten.

### **3.3.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle**

Warnzeitpunkte sind die Zeitpunkte vor einer Kollision, bei denen ein Systemeingriff durch Warnung erfolgt. Ziel ist es den Fahrer auf eine Gefahrensituation aufmerksam zu machen und eine eigenständige Unfallvermeidungshandlung zu ermöglichen. Es sind verschiedene Formen der Warnung, Anzei-

gekonzepte und haptischen Feedbackmöglichkeiten bekannt.<sup>82</sup> Rhede et al. (2011) stellen einen Warnbaukasten für Fahrerassistenzsysteme vor, der diese unterschiedlichen Warnmöglichkeiten in einem Stufenmodell integriert. Dieses Konzept wurde im Versuchsträger übernommen. Möglichkeiten zur Kritikalitätsbestimmung im Kreuzungsbereich, um einzelne Eskalationsstufen zu durchlaufen, werden in Abschnitt 2.3 vorgestellt. Die verschiedenen Möglichkeiten der Ausführung und der Eingriffszeitpunkte sind Gegenstand zahlreicher weiterführender Arbeiten und nicht Bestandteil dieser Arbeit. Warnungen, die sehr kurz vor einem Eingriff erfolgen<sup>83</sup>, dienen dem Fahrer mehr zur Plausibilisierung der Fahrzeugfunktion und des automatischen Eingriffs, um die Beherrschbarkeit beispielsweise bei Fehlauflösungen zu erhöhen, als der Gefahrenabwehr. Die Beurteilung und Bestimmung der Eingriffszeitpunkte aus psychologischer Sicht im Hinblick auf die Möglichkeiten des Fahrers zur Unfallvermeidung sind ebenso nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Eingriffszeitpunkte werden über ein prognostiziertes Unfallschwererisiko bestimmt. Diese Risikoprognose kann wiederum mit den Warn- und Eingriffszeitpunkten, die das menschliche Unfallvermeidungsvermögen berücksichtigen, kombiniert werden, um die verschiedenen Zeitbereiche einzuschränken.<sup>84</sup> Die Parametrierung der Abbruchbedingungen erfolgt herstellerabhängig im Rahmen der Zulassungsvoraussetzungen und ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

### **Beschränkung der Lenkwinkelgeschwindigkeit**

In der durchgeführten Probandenstudie wurde untersucht, ob ein automatischer Eingriff in die Lenkung in der Praxis durchführbar ist.<sup>85</sup> Voraussetzung dafür ist das verletzungsfreie Drehen des Lenkrads. In der Literatur findet sich nur wenig über Verletzungen, die durch das Drehen des Lenkrades entstanden sind. Ziel der Untersuchungen ist es, dabei immer die Verletzungsrisiken

---

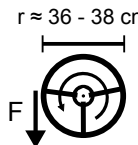
<sup>82</sup>Vergleiche Hoffmann & Gayko (2012, Abschnitt 24.3) für eine Übersicht der verfügbaren auditiven, visuellen und haptischen Warnmöglichkeiten. Sowie Grunert (2013) für eine Einführung in markierende Lichtfunktionen und ihre Wirkungsweise in Gefahrensituationen.

<sup>83</sup>Beispielsweise 50 ms bis 300 ms vorher.

<sup>84</sup>Vergleiche Abschnitt 4.2.

<sup>85</sup>Die hier vorgestellten Ergebnisse sind detailliert in Wykowski (2011) beschrieben.

am Lenkrad im Unfall zu bestimmen. Die verschiedenen Angaben sind im Anhang in Tabelle A.3 zusammengefasst, um einen Überblick zu geben, ab welchen Kräften es zu Verletzungen kommt. Die durch den Eingriff auftretenden Kräfte sind in Abbildung 3.31 dargestellt. Dabei entsteht im Worst-Case für eine Anforderung von 7 Nm und einem maximal 38 cm breiten Lenkrad eine Kraft von ca. 18 N, die deutlich unter den in der Literatur angegebenen Verletzungsschwellen liegt.


$$F = \frac{M}{r} = \frac{7 \text{ Nm}}{38 \text{ cm}} \approx 18,42 \text{ N}$$

**Abbildung 3.31:** Aus Lenkmoment maximal resultierende Kraft am Lenkrad

Abbildung 3.32 zeigt die Verletzungsschwellen in Abhängigkeit der Lenkwinkelgeschwindigkeit im Vergleich zu den maximal realisierbaren Lenkwinkelgeschwindigkeiten während der Fahrt. Zusätzlich wurden im Standversuch die Kontrollierbarkeit<sup>86</sup> und das Risiko für geringfügige Verletzungen durch einen Eingriff am Lenkrad untersucht.<sup>87</sup> Inklusive der Reaktionszeit dauerte es mindestens 400 ms nach Drehbeginn, bis das Lenkrad gestoppt werden konnte. Ein direkter Treffer auf den Daumen wirkt sich bei diesen Kräften

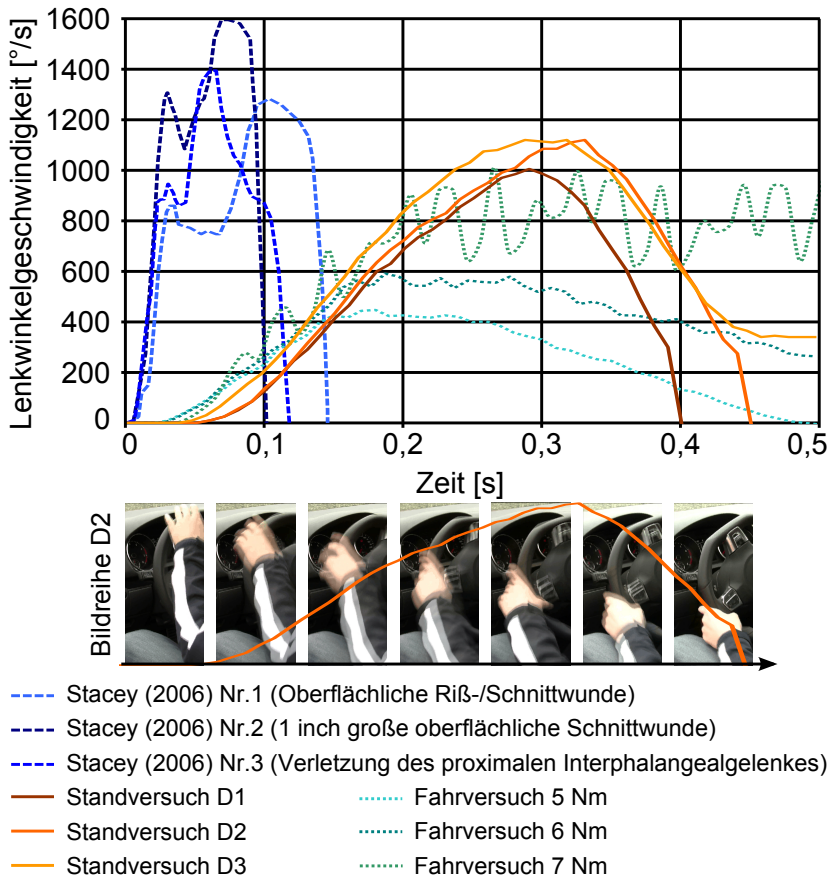
---

<sup>86</sup>Servel et al. (2006) definieren Kontrollierbarkeit als: „likelihood that the driver can cope with driving situations including ADAS-assisted driving, system limits and system failures“. In dem hier vorgestellten System wird das Lenkmoment so schnell wie möglich aufgeprägt und nicht langsam aufgebaut. Daraus ergibt sich der Nachteil, dass der Fahrer aus einem Eigenreflex der Muskeln eine Gegenbewegung einleitet (Schmidt & Lee 2011, Kapitel 5). Eine bewusste Kontrolle benötigt kognitive Ressourcen und ist bedingt durch die auftretenden Latenzen „ca. 150 bis 200 ms [verzögert] zwischen [der] Reizdarbietung und dem Beginn einer motorischen Reaktion“ (Schmidt 2009, Abschnitt 2.3.3). Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Probandenstudie – bei der nach 300 ms über 95 % der Probanden die Lenkbewegung gestoppt hatten – ist in diesen Lenkmoment-Größenordnungen davon auszugehen, dass im Falle eines Fehleingriffs der Eingriff (ob intuitiv oder bewusst) durch den Fahrer gestoppt wird. Dabei wird der bis dahin erreichte Lenkwinkel nur langsam zurück in die Ausgangslage korrigiert.

<sup>87</sup>Aus den insgesamt 18 Versuchen sind die drei Verläufe mit der kürzesten Zeit dargestellt, bis das Lenkrad kontrolliert werden konnte und die Drehung gestoppt wurde.

irritierend bis leicht schmerzhaft aus. Dabei wird das Lenkrad häufig nicht beim ersten Kontakt sofort gestoppt. Es rutscht vielmehr durch, so dass jede Speiche die Hand oder einen Finger trifft und dabei je Kontakt die Hand nach unten drückt, bis sich diese (bzw. der Arm) schließlich am Bein abstützt und damit das Lenkrad blockiert. Hält man das Lenkrad fest umschlossen mit einer Hand oder leicht umschlossen, dafür aber mit beiden Händen, kommt es nicht zu einer freien Drehung, sondern zu einem Ruck, der maximal eine Lenkwinkeländerung von  $90^\circ$  bewirkt.

**Anforderung 13 (maximale Eingriffsstärke am Lenkrad)** *7 Nm Lenkmoment mit einer Lenkwinkeländerung von  $1150^\circ/\text{s}$  sind bezüglich des, durch die Drehung verursachten, Verletzungsrisikos unbedenklich.*



**Abbildung 3.32:** Vergleich der Lenkwinkelgeschwindigkeiten bei Verletzungen aus Stacey & Kent (2006) mit bei Fahrversuchen (50 km/h) und verschiedenen Momenten (5,6,7 Nm) resultierenden Lenkwinkelgeschwindigkeiten. Zusätzlich sind drei Selbstversuche dargestellt, bei denen das Lenkrad bei maximaler Lenkwinkelgeschwindigkeit mit dem Daumen aus unterschiedlichen Richtungen gestoppt wurde. Bei den Selbstversuchen stand das Fahrzeug auf einer gewässerten Metallplatte (angefordertes Lenkmoment 7 Nm). Als Bildreihe ist dargestellt, wie Hand und Daumen durch Kontakt mit dem Lenkrad in Richtung Bein/Knie wandern und sich dort abstützen und damit das Lenkrad stoppen.



## 3.4 Gefahren- und Risikoanalyse

Bei der Entwicklung eines neuen Fahrerassistenzsystems für den Serieneinsatz muss dieses nach Stand von Wissenschaft und Technik schon während der Entwicklung abgesichert werden (Klindt & Handorn 2010). Für den hier vorgestellten Forschungsbeitrag kann diese geforderte Detailierung nicht geleistet werden. Dies liegt vor allem daran, dass für eine Bewertung genaue Definitionen der Systemgrenzen und der Interaktion an der Mensch-Maschine-Schnittstelle festgelegt sein müssen. Trotzdem erscheint es ratsam bereits in dieser frühen Phase zu überlegen, welche Anforderungen aus dem CoP-ADAS<sup>88</sup> bzw. einer Gefahren- und Risikoanalyse (G&R) resultieren, um diese in der Konzeptphase bereits zu berücksichtigen. Daher wurden bei der Bewertung die teilweise unbekannten Situationen mit hoher Exposition (E4), geringer Beherrschbarkeit (C3) und hoher Verletzungsschwere (S3) in Richtung Worst-Case abgeschätzt, insbesondere um keine Einflüsse von möglichen rechtzeitigen Fahrerwarnungen und unterstützenden Eingriffen zu inkludieren. Langfristig erscheint eine Erweiterung der ISO 15623<sup>89</sup> sinnvoll, um den Aspekt von kreuzendem Verkehr aufzunehmen.

Um einen möglichst breiten Sichtwinkel auf die Unfallfolgenminderung im Querverkehr zu erhalten, werden daher im Folgenden zunächst eine Reihe an möglichen Funktionsausprägungen diskutiert. Für den in dieser Arbeit praktisch umgesetzten Teil wird eine Analyse durchgeführt, in der Punkte aus dem CoP-ADAS schon in der Konzeptionsphase berücksichtigt wurden. Anschließend wird eine G&R nach ISO 26262<sup>90</sup> durchgeführt. Im Rahmen der G&R identifizierte Hazards halfen bei der Entwicklung von technischen Lösungen, die dazu dienen können zukünftig diese Systeme leichter umzusetzen.<sup>91</sup> Ein weiteres Ergebnis der G&R ist die Beschränkung der maximalen Auslösegeschwindigkeit bzw. die Definition der Systemgrenze zur Auslösung.

---

<sup>88</sup>Code of Practice: Entwicklung und Validierung von ADAS (Servel et al. 2006).

<sup>89</sup>Vergleiche ISO 15263 (2013).

<sup>90</sup>Vergleiche ISO 26262 (2011).

<sup>91</sup>Beispielsweise die Erweiterung eines Lenkeingriffs um eine Phase zur Rückführung auf die ursprüngliche Trajektorie im Falle einer Fehlauflösung (false-positive) (Heck & Junge 2014a).

### **3.4.1 Mögliche Funktionsausprägungen**

Zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr sind zahlreiche Funktionsausprägungen denkbar. Diese hängen unter anderem davon ab, welche Akteure<sup>92</sup> verwendet werden und welche Umfeldinformationen zur Verfügung stehen. Insbesondere in Abhängigkeit der Informationen über das gestoßene Fahrzeug<sup>93</sup> können verschiedene Funktionen realisiert werden, wie Abbildung 3.33 zeigt.

Funktionen, die nur die Lenkung nutzen, haben zwei prinzipielle Nachteile. Zum einen nehmen sie keine Energie aus der Kollision (sofern diese noch stattfindet) und zum anderen führen sie zu einer Richtungsänderung des stoßenden Fahrzeugs. Dadurch kann es im Falle einer Fehlauslösung oder bei Unfallvermeidung zu einem Verlassen des Fahrstreifens bzw. der Fahrbahn kommen. Daher sollte die Richtungsänderung entweder auf Kosten der Effizienz in seiner Größe limitiert werden oder durch eine Fahrbahn- bzw. Fahrstreifenerkennung ergänzt werden um sicherzustellen, dass die Eingriffe nicht zu einem Verlassen der Fahrbahn bzw. in die Fahrstreifen des Gegenverkehrs führen.<sup>94</sup> Damit ergeben sich auch erhöhte Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung.

Funktionen, die nur auf einer Bremsung basieren, können im Falle einer Objektdetektion das stoßende Fahrzeug so weit verzögern, dass eine Kollision vermieden werden kann. Wenn nicht sichergestellt werden kann, dass durch die Bremsung eine Kollision vermieden wird, muss zurzeit von einer reinen Bremsung bei Detektion einer Querverkehrskollision mit einem unbekannten Objekt abgeraten werden. Ohne die Information über die Fahrgastzelle und die Bewertung der resultierenden Trefferlage (TL) kann es sonst zu einer Verschiebung der Trefferlage kommen, die trotz Geschwindigkeitsabbau zu einer höheren Verletzungsschwere führt.<sup>95</sup> Steht neben der Fahrgastzellenin-

---

<sup>92</sup>Bremsung, Lenkung oder beides kombiniert.

<sup>93</sup>Angeordnet in aufsteigender Reihenfolge von einfach bis komplex: Nur querendes Objekt, Fahrzeug mit bekannter Fahrgastzelle, Fahrzeug mit bekannter Fahrgastzelle und Sitzbelegung bis hin zu einem kooperativen Abstimmen des Manövers.

<sup>94</sup>Heck & Junge (2014a) schlagen beispielsweise ein „Kompensationsmanöver“ für Eingriffe zur Kollisionsvermeidung und Kollisionsfolgenminderung vor, falls keine Kollision erfolgt.

<sup>95</sup>Beispielsweise bei der Verschiebung vom Vorderwagen in den Bereich der Fahrgastzelle. Vergleiche Abschnitt 3.1.2.

Verwendete Aktionen	Vermeidung oder Trefferlagenänderung: Fahrer- gastzelle (Lenkung erhöht Verschiebung bei kurzer oder langer Eingriffsdauer) oder Trefferlagenänderung: Vorderwagen →Vorderachse (Lenkung ermöglicht zusätzliches Verzögern)	Vermeidung oder TLA Fahrer- gastzelle →Vorder- achse (Zusätzlich in Bereiche die nicht belegt sind im Hinterwagen und unbelegte Fahrgastzellenabschnitte)	Vermeidung oder gemeinschaftlich bestimmte Trefferlagen- änderung anhand situationsspezifischer Verletzungsrisiko- funktionen
Bremsen und Lenken	Vermeidung oder Trefferlagenänderung: Fahrer- gastzelle (Lenkung erhöht Verschiebung bei kurzer oder langer Eingriffsdauer) oder Trefferlagenänderung: Vorderwagen →Vorderachse (Lenkung ermöglicht zusätzliches Verzögern)	Vermeidung oder TLA Fahrer- gastzelle →Vorder- achse (Zusätzlich in Bereiche die nicht belegt sind im Hinterwagen und unbelegte Fahrgastzellenabschnitte)	Vermeidung oder gemeinschaftlich bestimmte Trefferlagen- änderung anhand situationsspezifischer Verletzungsrisiko- funktionen
Nur Bremsen	Vermeidung oder Trefferlagenänderung: Fahrer- gastzelle (Lenkung erhöht Verschiebung bei kurzer oder langer Eingriffsdauer) oder Trefferlagenänderung: Vorderwagen →Vorderachse (Lenkung ermöglicht zusätzliches Verzögern)	Vermeidung oder TLA Fahrer- gastzelle →Vorder- achse (Zusätzlich in Bereiche die nicht belegt sind im Hinterwagen und unbelegte Fahrgastzellenabschnitte)	Vermeidung oder gemeinschaftlich bestimmte Trefferlagen- änderung anhand situationsspezifischer Verletzungsrisiko- funktionen
Nur Lenken	Keine Funktion möglich (Aufgrund möglichen ungetreuen Verlassens des Fahrers bei einer Unfallvermeidung)	Trefferlagenänderung Fahrer- gastzelle →Hinterachse (begrenzter Wirkungsbereich)	Vermeidung oder gemeinschaftlich bestimmte Trefferlagen- änderung anhand situationsspezifischer Verletzungsrisiko- funktionen
	Objekt- erkennung	Fahrgastzellen- erkennung	Insassenerkennung des Gestoßenen (einseitig)
			Insassenerkennung (gegenseitig), kooperatives Fahrmanöver
			Sensorik- bzw. Funktions- merkmal

Detailliert betrachtet  
und im Rahmen der Arbeit  
exemplarisch umgesetzte Funktionen

**Abbildung 3.33:** Mögliche Funktionsausprägungen einer Notbremsfunktion im Querverkehr. Hervorgehoben ist die in dieser Arbeit näher untersuchte Funktion. Das Potenzial zur Unfallvermeidung und Verletzungsreduktion steigt von links nach rechts.

formation zusätzlich die Information zur Sitzbelegung<sup>96</sup> zur Verfügung, kann neben der Hinterachse (TL 10) auch eine Trefferlage weiter vorne in der Fahrgastzelle bzw. im Hinterwagen abgebremst werden. Dies hat den Vorteil, dass ein größerer Anteil des Wirkfeldes zur Kollisionsvermeidung ausgeschöpft werden kann, da beispielsweise der im Falle einer angestrebten aber missglückten Vermeidung getroffene Hinterwagen dann nicht belegt ist. Gleichzeitig erlaubt dies bei der Auslegung mehr Spielraum für die Handlungen des gestoßenen Fahrzeugs.<sup>97</sup> Liegt die ursprüngliche Trefferlage im Bereich des Vorderwagens, muss abgewogen werden, ob eine Verzögerung durchgeführt wird, die bis zur Hinterachse oder nur zur Vorderachse führt. Im Falle der Hinterachse ist zu beachten, dass die Bremsung zu einer Trefferlagenverschiebung durch den zu schützenden Teil der gegnerischen Fahrgastzelle führt und damit im Falle einer Abweichung<sup>98</sup> zu schwerwiegenden medizinischen Unfallfolgen beitragen kann. Für das im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte Konzept wird daher im Bereich des Vorderwagens nur bis zur Vorderachse verzögert.

Funktionen, die Bremsung und Lenkung kombinieren, haben das größte Unfallfolgenminderungspotenzial. Durch die Lenkung kann, schon während der Bremsdruck aufgebaut wird, ein kleiner Versatz erzeugt werden. Dieser wird umso größer, je früher man die Funktion auslöst. Gleichzeitig ergibt sich eine bessere Ausnutzung des Kraftschlusspotenzials mit der Straße.<sup>99</sup> Der wesentliche Vorteil ist allerdings, dass der Anteil der Trefferlagenänderung durch die Lenkung unabhängig von der Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs ist.<sup>100</sup> Damit lässt sich die Funktion auch für geringe Geschwindigkeiten des gestoßenen Fahrzeugs, beispielsweise für ein gerade anfahrendes oder stehenbleibendes Fahrzeug, realisieren.

---

<sup>96</sup>Beispielsweise durch C2C Kommunikation.

<sup>97</sup>Beispielsweise im Falle von (Not-) Bremsungen des gestoßenen Fahrzeugs, da diese der Trefferlagenänderung durch den Stoßenden direkt entgegenwirken.

<sup>98</sup>Diese kann durch nicht mehr von der Regelung überkompensierbare Reibwertänderungen, Übersteuerung des Fahrers, Abbremsen des anderen Fahrzeugs etc. eine Vielzahl an Gründen haben.

<sup>99</sup>Vergleiche Heck et al. (2012a).

<sup>100</sup>Im Gegensatz zur Bremsung, bei der die Trefferlagenänderung aus der zeitlichen Differenz, die bis zum Kollisionspunkt aufgebaut wird, und dem zwischenzeitlich zurückgelegten Weg des gestoßenen Fahrzeugs resultiert.

Zusätzlich ist es denkbar für eine Trefferlage im Bereich des Vorderwagens, bei dem die Vorderachse per Bremsung erreicht werden soll, quasi entgegen der Bremsung zu lenken. Durch das Lenken wird die Trefferlage weiter nach vorne geschoben. Der damit erreichte Versatz in Fahrtrichtung des gestoßenen Fahrzeugs kann durch eine verstärkte<sup>101</sup> Bremsung überkompensiert werden und erlaubt damit einen stärkeren Bremseingriff mit größerer Geschwindigkeitsreduktion. Die resultierende Trefferlage bleibt auf der Vorderachse. Ohne den Effekt der Lenkung würde sie in den Bereich der Fahrgastzelle wandern.

Kooperative Lösungen haben den Vorteil, dass beide Systeme eine Auslösung abstimmen können. Anhand einer situationsspezifischen Verletzungsriskofunktion kann die ideale Kombination aus Eingriffen und Trefferlage abgestimmt werden. Zudem können Eingriffe des Fahrers an das jeweils andere Fahrzeug kommuniziert werden.<sup>102</sup> Damit ergibt sich die Möglichkeit die Unsicherheiten bezüglich des Verhaltens des anderen Fahrzeugs zu minimieren. Dieses kann daraufhin sofort den eigenen Eingriff anpassen und muss nicht auf eine über die maschinelle Wahrnehmung messbare Reaktion warten. Auch für die Erkennung von Kollisionen ergeben sich durch die reduzierten Unsicherheiten Vorteile. Demgegenüber stehen mögliche Folgen durch fehlerhafte oder bewusst manipulierte Absprachen, die zu einer Situationsverschlechterung führen können.

Das in dieser Arbeit vorgestellte System nutzt im Wesentlichen die Bremsung. Es wurden aber auch Versuche und Studien in Kombination mit der Lenkung durchgeführt.<sup>103</sup> Die maschinelle Wahrnehmung stellte Informationen über die Länge des gestoßenen Fahrzeugs und die Position der Räder und damit indirekt über die Fahrgastzelle zur Verfügung. Zusätzlich wurden die

---

<sup>101</sup> Entweder über höheren Bremsdruck oder eine frühere Auslösung.

<sup>102</sup> Es erscheint unwahrscheinlich, dass die Systeme das Verhalten bzw. die Verhaltensänderungen des jeweils anderen Fahrzeugs ihrem Fahrer anzeigen, da dieser zunächst die Anzeige sowie die aktuelle Verkehrssituation erfassen und verstehen muss, um die Warnung mit der Situation abzugleichen.

<sup>103</sup> Effekte durch einseitiges Bremsen oder Einzelradbremsungen wurden im Rahmen der Arbeit auch untersucht. Dies wurde jedoch nicht als Teil der Funktion umgesetzt. Zum einen aufgrund des geringen Potenzials zur Richtungsänderung in den anvisierten Zeiträumen, bedingt durch den langsamen Druckaufbau, zum anderen aufgrund der möglichen Begünstigung von instabilen Fahrzuständen.

Geschwindigkeit und die Beschleunigung bzw. Verzögerung des gestoßenen Fahrzeugs gemessen. Das System kann entweder eine Bremsung zur Unfallvermeidung durchführen oder Trefferlagen im Bereich des Vorderwagens bis zur Vorderachse abbremsen bzw. Trefferlagen im Bereich der Fahrgastzelle auf die Hinterachse überführen.

## **3.4.2 CoP-ADAS: Entwicklung und Validierung**

Der im Rahmen des EU-Projekts PReVent entwickelte „Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von künftigen Fahrerassistenzsystemen (ADAS)“ (CoP-ADAS) hat zum Ziel die rechtlichen Aspekte und die daraus entstehenden Herausforderungen und Konsequenzen für die Hersteller beherrschbar zu machen (Serval et al. 2006). Dies wird vor allem durch die Einigung auf eine gemeinsame Vorgehensweise zur Bewertung von Sicherheitsaspekten der zu entwickelnden Fahrerassistenzsysteme erreicht. Die beschriebenen Methoden haben einen starken Fokus auf die Mensch-Maschine-Interface (MMI). Dabei werden insbesondere die Systemgrenzen beschrieben sowie die Interaktion zwischen Funktion und Fahrer mit dem Ziel, die Funktion möglichst beherrschbar zu machen, auch im Falle eines Systemausfalls bzw. im Grenzbereich der Funktionen. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit anhand der angegebenen Checklisten<sup>104</sup> die hier vorgestellte Funktion zu bewerten. Zur Bewertung muss eine wesentlich präzisere Vorstellung des MMI und dessen Funktionsweise vorliegen. Im Rahmen des interactive Projekts wurde eine solche detaillierte Beschreibung für eine ähnliche Funktion vorgestellt und ausführlich in Simulatorstudien in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Centro Tecnológico de Automoción de Galicia (CTAG) bewertet. Vergleiche Mäkinen et al. (2010, 4.3.3) für die Anforderungen zur Funktion, Hesse et al. (2012, insbesondere Annex 5) für eine genaue Definition des MMI und Brockmann et al. (2012, Kapitel 13.3) für einen ausgiebigen Test und Evaluation im Simulator.

---

<sup>104</sup>Die im CoP-ADAS formulierten Checklisten widmen sich explizit den Bereichen Betriebsmodi, Systemgrenzen, Warnungen, Darstellung, Fehlgebrauch, Missbrauch, Übersteuerbarkeit und Systemerwartung.

Diese Vorgehensweise soll hier wegen der hohen Detaillierungsebene nicht wiederholt werden, die Erkenntnisse aber dennoch aufgegriffen werden.<sup>105</sup>

Wichtig ist eine klare Definition der Phasen des Eingriffs. Für eine Funktion, die Unfälle im Querverkehr behandelt, hat sich eine Vorgehensweise analog Abschnitt 2.2.3, bei der eine TTC zur Kollision mit der prädierten Trefferlage verwendet wird, als vorteilhaft erwiesen. Für jede Phase muss definiert werden, wie die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer gestaltet ist. Das beinhaltet eine klare Definition der Systemgrenzen durch die verwendete Umfeldwahrnehmung (auch vor dem Hintergrund der Systemerwartungen), die Darstellung der Betriebsmodi und Warnungen sowie Möglichkeiten zur Übersteuerbarkeit.<sup>106</sup> Wenn eine Kollision unvermeidbar ist, spricht der CoP-ADAS von einer Situation die „beyond controllability“ ist. Auf diesen Zustand muss gesondert eingegangen werden, insbesondere vor dem Hintergrund einer Fehlalarmlösung (false-positive). Vor einer Fehlalarmlösung ist die Situation aus Sicht der maschinellen Wahrnehmung und Situationsinterpretation durch den Fahrer nicht mehr beherrschbar. Für diesen wird jedoch erst durch den unerwarteten automatischen Eingriff die Kontrolle über das Fahr-

---

<sup>105</sup> Anzumerken ist, dass ein Fahrermodell, das die Warn- und Eingriffszeitpunkte speziell an die Fahrweise des Fahrers adaptiert und beispielsweise in drei Stufen (konservativ, normal und sportlich) arbeitet, den Nutzen für konservative Fahrer erhöhen kann und die Fehlalarmrate (false-positive) für sportliche Fahrer reduzieren kann. Vergleiche Brockmann et al. (2012, Kapitel 13.3).

<sup>106</sup> Dabei müssen auch Überlegungen zum vorhersehbaren Fehlgebrauch (insbesondere in der G&R) und zum Missbrauch bzw. zur Gebrauchssicherheit vorgenommen werden. Maus & Junge (2013) weisen auf diesen Fehlgebrauch durch das steigende Vertrauen in die Automation hin („trust in automation“), der durch den Hersteller verhindert werden sollte.

Die automatischen Eingriffe im Querverkehr haben bei Probandenversuchen gezeigt, dass diese so spät kamen, dass die Fahrer entweder schon lange reagiert hatten oder sich der Gefahrensituation nicht bewusst waren (vergleiche Abschnitt 5.1). Daher wird das Potenzial für vorsätzlichen Missbrauch als gering eingeschätzt.

Ein zunehmendes Vertrauen in die Automation birgt allerdings das Risiko, dass Fahrer Kreuzungen häufiger und vor allem schneller überfahren, als sie es ohne System täten. Mit zunehmendem Vertrauen werden dann beispielsweise Rotlicht- und Stoppschildverstöße unter dem Eindruck begangen, ein zusätzliches Sicherheitssystem zu haben, sollten die Fahrer etwas übersehen haben. Für diesen Fall böte sich beispielsweise die Kombination mit Rotlicht- und Stoppschildassistenten an, um den Fahrer auf sein Fehlverhalten aufmerksam zu machen. Denkbar ist es auch die Auslösung zu verschärfen, beispielsweise indem das Fahrzeug sicher angehalten wird und ein Zündungswechsel zur Weiterfahrt notwendig ist.

zeug schwierig, da keine Gefahrensituation vorliegt und er versuchen muss die Kontrolle über das Fahrzeug zu behalten bzw. schnellstmöglich wiederzuerlangen.

**Anforderung 14 (Definition der Systemgrenzen)** *Es müssen alle Phasen des Eingriffs definiert sein, inklusive der Warnungen und Möglichkeiten zur Übersteuerung durch den Fahrer.*

### **3.4.3 G&R nach ISO 26262**

Die ISO 26262 begleitet im Gegensatz zum CoP-ADAS nicht nur die Konzeptphase, sondern auch die Produktentwicklung zur Minimierung der Risiken von sicherheitsrelevanten elektrischen und programmierten elektronischen Systemen im Automobil. Die ISO 26262 kann dabei auf ein vollständiges System angewendet oder schon in der Konzeptphase genutzt werden, um entsprechende Bewertungen zu erhalten. Daher wurde die Methodik entsprechend vereinfacht auf das bestehende Konzept mit Bremsung und Lenkung angewendet. Im Folgenden soll in Anlehnung an Teil 3 der Norm eine vereinfachte „hazard analysis and risk assessment“<sup>107</sup> vorgestellt werden. Ziel ist eine Identifikation kritischer Situationen und die Darstellung der benötigten Sicherheitsmaßnahmen, um diese beherrschbar zu machen. Als Ergebnis ergibt sich eine ASIL-Bewertung<sup>108</sup>, anhand derer die Anforderungen an die Produktentwicklung eingeordnet werden können. Zudem erlaubt die ASIL-Bewertung die gezielte Anpassung (z.B. bremsen statt lenken) der Systemgrenzen<sup>109</sup> bzw. das Suchen geeigneter technischer Lösungen, um die ASIL-Bewertung möglichst gering zu halten.<sup>110</sup> Bei der Bewertung werden die Sys-

---

<sup>107</sup> Hier als Gefahren- und Risikoanalyse (G&R) bezeichnet.

<sup>108</sup> Automotive Safety Integrity Level (ASIL), beschreibt die Sicherheitsanforderungsstufe, die bei der Entwicklung eines Systems beachtet werden muss. Die Stufen reichen von A (niedrigste Anforderungen) bis D (höchste Anforderungen). Wenn die Einstufung unterhalb der Stufe A liegt, müssen grundlegende Maßnahmen zur Qualitätssicherung (als QM bezeichnet) beachtet werden.

<sup>109</sup> Beispielsweise Geschwindigkeitsbereiche, in denen das System funktionieren soll („City-Notbremse“).

<sup>110</sup> Je höher die ASIL-Bewertung, desto höher sind später auch die Kosten bei der Systementwicklung. Viele Systeme lassen sich nur realisieren, wenn die Kosten in einem günstigen



temgrenzen systematisch auf ein mögliches Versagen untersucht. Grundlage für die Bewertung ist die Einordnung aller für relevant gehaltenen Versagens-situationen nach drei Kriterien<sup>111</sup>:

**Exposition (E):** Wie häufig ist die Person bzw. das Fahrzeug der Situation ausgesetzt? Im Folgenden wird, ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit, als Person nur der Fahrer des stoßenden Fahrzeugs betrachtet. Dabei wird die Exposition über die Häufigkeit, in der jeweiligen Verkehrsdomäne zu fahren, angegeben.

**Kontrollierbarkeit (C):** Wie gut kann der Fahrer die Situation beherrschen? Im Folgenden wird nur der Fahrer des stoßenden Fahrzeugs betrachtet. Dabei wird die Kontrollierbarkeit in Anlehnung an den CoP-ADAS angepasst.

**Medizinische Verletzungsschwere (S):** Wie lebensgefährlich sind die Verletzungen einer Person? Im Folgenden wird die von Junge (2014) vorgeschlagene verschärfte Bewertung unter Berücksichtigung der AIS Skaleneigenschaften genutzt, die eine Zusammenfassung zu AIS Wahrscheinlichkeiten erlaubt.<sup>112</sup>

Die dreigeteilte Bewertung wird entweder anhand der in der Norm vorgegebenen Beispiele bewertet oder anhand eigener, besser auf den Kontext passender, Kriterien durchgeführt.

Für die Berechnung der resultierenden ASIL-Parameter wurde das in der Norm beschriebene Vorgehen verwendet. Die Beurteilung der zu wählenden S-Parameter wurde anhand des Codebooks<sup>113</sup> der Volkswagen Unfallforschung vorgenommen. Das Codebook kann verwendet werden, um für nur über Front-, Seiten- oder Heckcrash inklusive der Trefferlage beschrie-

---

Verhältnis zum Kundennutzen stehen. Eine frühzeitig schon in der Forschung beginnende Suche nach einer Lösung, diese Einstufung zu senken, ist daher im Sinne der Förderung zur Verbreitung neuer Systeme. Zusätzlicher Nutzen ist die frühzeitige Schaffung von Bewertungsgrundlagen.

<sup>111</sup>Vergleiche Tabelle A.4 für eine genaue Auflistung bzw. die Beschreibungen in ISO 26262 (2011).

<sup>112</sup>Bewertet wird laut ISO 26262 (2011) die Überlebenswahrscheinlichkeit der Verletzungen nach AIS. Die sich bei dieser Angabe der Verletzungsschwere ergebenden Nachteile sind in Abschnitt 2.1 diskutiert worden bzw. detailliert in Junge (2014) dargestellt.

<sup>113</sup>Vergleiche im Anhang Tabelle A.8 nach Junge (2014).

bene Unfälle eine Bewertung der Verletzungsschwere vorzunehmen. Für die Bewertung müssen zum einen der Effekt der Geschwindigkeit, zum anderen die vorhandene passive Sicherheit des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Damit hängen die Unfallschwere und damit die Bewertung des aktiven Systems von der Kollisionsgeschwindigkeit und dem Schutz, den das Fahrzeug somit bei der gegebenen Geschwindigkeit den Insassen bietet (passive Sicherheit), ab.<sup>114</sup> Die Kollisionsgeschwindigkeit wird wiederum durch die maximal zulässige Geschwindigkeit in den verschiedenen Verkehrsdomänen abgebildet. Eine Bildung von Systemgrenzen über die maximale Geschwindigkeit ist später auch für den Nutzer gut verständlich. Die Maßnahmen der passiven Sicherheit werden grob in folgende Klassen eingeteilt: alte Fahrzeuge (Alt), neue Fahrzeuge (Neu), neue Fahrzeuge mit Seitenairbag (Curtain) (Neu+).<sup>115</sup> Dabei wird für das stoßende Fahrzeug mit System davon ausgegangen, dass es sich um ein Fahrzeug vom Typ Neu+ mit Seitenairbag (Curtain) handelt. Das gestoßene bzw. evtl. bei Fehlauslösungen auffahrende Fahrzeug wird im Rahmen der Worst-Case Betrachtung als ein Fahrzeug vom Typ Alt angenommen.

Die Tabellen der Gefahren- und Risikoanalysen sind vollständig im Anhang in Abschnitt A.6 abgebildet. Zur Diskussion von implementationsabhängigen Systemgrenzen sollen im Folgenden kurze Auszüge aus der G&R vorgestellt werden. Dabei gilt es, insbesondere den technischen Aufwand für einen Systemeingriff gegenüber dem zu erwartenden Nutzen abzuwägen.

Tabelle 3.5 zeigt die ASIL-Bewertung für einen Systemeingriff zur Trefferlagenänderung auf die Hinterachse. Die Exposition wird über die Häufigkeit, in der entsprechenden Domäne zu fahren, abgeschätzt. Diese muss als ma-

---

<sup>114</sup>Dieser Aspekt, dass im Versagensfall des Systems die S-Parameter deutlich durch die vorhandene passive Sicherheit beeinflusst werden, ist vor allem vor dem Hintergrund interessant, dass teilweise davon ausgegangen wird, dass mit zunehmender Verbreitung der aktiven Sicherheit die passive Sicherheit eine kleinere Rolle für die Fahrzeugsicherheit spielen wird. Berücksichtigt man die Bewertungsmethodik, für die im Versagens- und Fehlerfall die passive Sicherheit eine wesentliche Rolle spielt, scheint diese Ansicht zumindest für die nahe Zukunft unwahrscheinlich, da eine bessere passive Sicherheit auch zu einer niedrigeren ASIL-Bewertung der aktiven Sicherheit führt.

<sup>115</sup>Beispiele für die Klassen sind: (Alt) Polo 6N, Lupo, Audi A2, Golf III, Golf IV, Skoda Fabia I; (Neu) Fahrzeuge ab Baujahr 2010, z.B. Polo 9N, Polo 6R, Audi A1, Golf V, VI, VII; (Neu+) Fahrzeuge vom Typ 'Neu', die jedoch einen Seitenairbag (Curtain) verbaut haben.

**Tabelle 3.5:** Auszug der ASIL-Bewertung (vergleiche Tabelle A.5) für eine korrekte Aktivierung im Vergleich mit fehlender Auslösung bei deaktiviertem System. Abkürzungen: Fahrgastzelle (FGZ), stoßendes Fahrzeug (SF), gestoßenes Fahrzeug (GF)

Verkehrsdomäne	Systemstatus	resultierende Trefferlage	E-Wert	C-Wert	S-Wert (SF, Neu+)	S-Wert (GF, Alt)	ASIL
Fahren im Wohngebiet (SF 30 km/h)	Aus	FGZ	4	3	1	2	C
	Ein	Heck	4	3	1	1	B
Fahren in der Stadt (SF 50 km/h)	Aus	FGZ	4	3	1	3	D
	Ein	Heck	4	3	1	1	B
Ausfallstraßen (SF 60 km/h)	Aus	FGZ	4	3	1	3	D
	Ein	Heck	4	3	1	1	B
Landstraßen - Kreuzungen (beide 80 km/h)	Aus	FGZ	4	3	1	3	D
	Ein	Heck	4	3	1	2	C
Landstraßen - Auffahrten (SF 100 km/h, GF 30 km/h)	Aus	FGZ	3	3	3	3	C
	Ein	Heck	3	3	3	3	C

ximal (E4) angenommen werden. Die Kontrollierbarkeit wird, da die Systemeingriffe nur in unerwarteten, nicht trainierten und nicht vorkonditionierten Situationen auftreten, als schwierig (C3) angenommen. Durch diese beiden sehr hohen Abschätzungen ergibt sich ein ASIL, der direkt von der auftretenden schwersten Verletzung abhängt. Deutlich wird bei dieser Darstellung der Systemnutzen gegenüber dem ausgeschalteten Zustand: Für niedrige Geschwindigkeiten in der Stadt und auf Ausfallstraßen (bis 60 km/h) ergibt sich ein ASIL B. Mit steigender Kollisionsgeschwindigkeit kommt die Funktion an eine Systemgrenze. Durch die höhere Energie im Crash kommt es zu einer entsprechend höheren Bewertung der Verletzungsschwere (S2 & S3). Da-

her ergibt sich außerorts an den verbleibenden Kreuzungsmöglichkeiten ein ASIL C.

**Tabelle 3.6:** Auszug der ASIL-Bewertung (vergleiche Tabelle A.5) für eine gerechtfertigte aber fehlerhafte Aktivierung. Abkürzungen: Fahrgastzelle (FGZ), stoßendes Fahrzeug (SF), gestoßenes Fahrzeug (GF)

Verkehrsdomäne	Fehlerart	resultierende Trefferlage	E-Wert	C-Wert	S-Wert (SF, Neu+)	S-Wert (GF, Alt)	ASIL
Fahren in der Stadt (SF 50 km/h)	Eingriff zu früh/ zu groß	FGZ	4	3	1	3	D
		Heck	4	3	1	1	B
Fahren in der Stadt (SF 50 km/h)	Eingriff zu spät/ zu gering	FGZ	4	3	1	3	D
		Heck	4	3	1	3	D
Jede Domäne	Keine Auslösung (false-negative)	Entspricht Fahrzeug ohne System					

Betrachtet man Systemauslösungen, die entweder in ihrer Ausprägung bezüglich der Höhe des Eingriffs oder bezüglich des Aktivierungszeitpunkts fehlerhaft sind, ergeben sich zwei fehlerhafte Ausprägungen, die in Tabelle 3.6 dargestellt sind. In beiden Fällen muss die resultierende Trefferlage genauer betrachtet werden und auch mit der ursprünglichen Trefferlage verglichen werden. Bleibt ein Eingriff völlig aus, generiert das System keinen Nutzen und muss bewertet werden wie ein Unfall ohne aktives System. Da anzunehmen ist, dass ein Basisfahrzeug auch für den Verkauf ohne System ausgelegt wird, ist dieser Fall unproblematisch, da er die Unfallsituation für keinen der Beteiligten verschlimmert. Erfolgt der Eingriff zu früh bzw. wird er zu stark durchgeführt, kommt es günstigenfalls zu einer Vermeidung, die nicht abgebildet ist. Andernfalls werden deutlich über 20 km/h abgebaut. Damit erreicht man eine Position, die zwar in einem anderen Bereich des gestoßenen Fahrzeugs liegen kann, aber durch das reduzierte Geschwindigkeitsni-

veau werden die S-Parameter der Verkehrsdomäne „Wohngebiet“ verwendet, in der langsamer gefahren wird. Dennoch ergibt sich für eine Trefferlage im Bereich der Fahrgastzelle, beispielsweise bei einem Versuch die Trefferlage vom Vorderwagen auf die Hinterachse zu verschieben, ein ASIL D. Dieser lässt sich entweder über die Einschränkung des Handlungskonzepts oder über stark erhöhte technische Anforderungen<sup>116</sup> abfangen und zeigt somit vermutlich eine Systemgrenze für die nähere Zukunft auf.

Erfolgt der Eingriff zu spät bzw. wird er zu gering durchgeführt, ergeben sich hohe Verletzungswahrscheinlichkeiten, da stets von einer teilweisen Überlappung des stoßenden Fahrzeugs in den Bereich der Fahrgastzelle ausgegangen werden muss. Dieser Fall muss daher auch gesondert eingeschränkt werden.

Eine Möglichkeit über das Handlungskonzept zu einer niedrigen Bewertung zu kommen ist die Reduktion auf Auslösefälle, bei denen ein ursprünglicher Treffer im Bereich der Fahrgastzelle liegt. Auch ein Misslingen, diese Trefferlage auf die Hinterachse zu verschieben, wird durch die erfolgte Geschwindigkeitsreduktion keine grundsätzliche Verschlimmerung der Verletzungsschwere erzeugen. Damit wäre jedoch nur die Ausführung des Eingriffs abgesichert, nicht jedoch die fehlerhafte Erkennung, bei der eine ursprüngliche Trefferlage im Vorderwagen fälschlicherweise als Trefferlage im Bereich der Fahrgastzelle angenommen wird. In diesem Fall würde durch einen Eingriff die resultierende Trefferlage im Bereich der Fahrertür liegen.

Um die Auswirkungen einer fehlerhaften Erkennung der Trefferlage zu minimieren, kann daher eine kontinuierliche Trefferlagenerkennung während des Eingriffs durchgeführt werden. Für jeden Zeitschritt kann die resultierende Trefferlage mit Fortführung oder Abbruch des Eingriffs berechnet werden und der günstigere Fall, bezüglich der resultierenden Unfallschwere aller Beteiligten, ausgewählt werden. Durch die kontinuierliche Suche nach optimalen Trefferlagen wird für jeden Teilschritt das jeweilige Optimum der erreichbaren Verletzungsschwere bestimmt. Dadurch ist es möglich, dass für den Eingriff nicht das globale Verletzungsschwereoptimum erreicht wird. Al-

---

<sup>116</sup>Beispielsweise eine verlässliche Reibwertschätzung und eine kooperative Abstimmung des Eingriffs.

lerdings erhöht die Redundanz die Fehlertoleranz, insbesondere im Hinblick auf den Handlungsraum der anderen Verkehrsteilnehmer.

**Anforderung 15 (Kontinuierliche Trefferlagenüberwachung)** *Während eines Eingriffs muss die Trefferlage kontinuierlich neu bestimmt werden. Jede Änderung ist bezüglich einer Fortführung, Abbruch oder notwendigen Veränderung zu bewerten.*

Die Bewertung der unerwarteten Fehlauflösungen (false-positive) sind in Tabelle 3.7 dargestellt. Dabei war es das vorrangige Ziel eine Systemgrenze bezüglich der schnellsten Verkehrsdomäne weiter zu untersuchen. Auffällig ist, dass für Autobahnen im Vergleich zu Landstraßen eine geringere Einstufung vorgenommen wurde, und zwar aufgrund der geringeren Unfallschwere<sup>117</sup>, aber auch aufgrund der Annahme, dass das System in dieser Domäne besser<sup>118</sup> zu kontrollieren ist. Nachteilig ist der geringe Eigenschutz der auf-fahrenden Fahrzeuge vom Typ Alt. Vor diesem Hintergrund muss diskutiert werden, ob zum Zeitpunkt des Einsatzes im jeweiligen Markt noch eine signifikante Anzahl an Fahrzeugen vom Typ Alt existieren werden. Unter der Annahme, dass nur Fahrzeuge vom Typ Neu+ auf dem Markt sind, kann durch eine Begrenzung der Geschwindigkeit bei Auslösung ein ASIL von A bzw. B erreicht werden.<sup>119</sup>

Mit dem Blick auf zukünftige Fahrzeuggenerationen ist zu diskutieren wie sich die Gefahren- und Risikoanalyse ändert, wenn die gestoßenen Fahrzeuge auch ein System haben, das versucht die Trefferlage zu beeinflussen. Diese Betrachtung sichert auch den Fall ab, dass der Fahrzeugführer im gestoßenen Fahrzeug die Gefahrensituation erkennt und beispielsweise reflexhaft

---

<sup>117</sup>Heinrich et al. (2010, Abschnitt 4.1 und 5.0) geben an, dass die Unfallschwere auf Landstraßen mehr als doppelt so hoch ist wie auf anderen Straßenklassen. 16 % der Pkw-Pkw Kollisionen finden dabei an Knotenpunkten mit einer sehr hohen Unfallschwere von 35 Getöteten pro 1.000 Unfällen statt.

<sup>118</sup>Aufgrund der breiteren Fahrstreifen, der größeren Abstände zwischen den Fahrzeugen und der Freifläche, solange man sich auf dem rechten Fahrstreifen befindet, in Form des Standstreifens.

<sup>119</sup>Der Unterschied in der ASIL-Bewertung auf Ausfallstraßen zwischen reiner Bremsung und kombiniertem Bremsen und Lenken ist auf die schnellere Reaktion des Fahrers zurückzuführen, da bei der Aktivierung von zwei haptischen Kanälen nach Experteneinschätzung schneller eine Systemreaktion unterbunden wird (gewonnen durch zahlreiche Fehlauflösungen während der Systementwicklung).

**Tabelle 3.7:** Auszug der ASIL-Bewertung (vergleiche Tabelle A.6) von Fehlauslösungen des Systems im Fahrzeug vom Typ Neu+. Für das auffahrende Fahrzeug wird sowohl der Worst-Case als Fahrzeug vom Typ Alt als auch ein Fahrzeug vom Typ Neu+ mit entsprechenden ASIL-Bewertungen angegeben. Abkürzungen: auffahrendes Fahrzeug (AF)

Fehlauslösung (false-positive)	Verkehrs- domäne	E-Wert	C-Wert	S-Wert (System)	S-Wert (AF, Alt)	S-Wert (AF, Neu+)	ASIL (Alt)	ASIL (Neu+)
Bremsung	Ausfallstraße	4	3	1	2	1	C	B
	Landstraße	4	3	3	3	3	D	D
	Autobahn	3	2	3	3	3	B	B
Lenkung	Ausfallstraße	4	2	1	2	1	B	A
	Landstraße	4	3	3	3	3	D	C
	Autobahn	3	2	3	3	3	B	B
Bremsung und Lenkung	Ausfallstraße	4	2	1	2	1	B	A
	Landstraße	4	3	3	3	3	D	C
	Autobahn	3	2	3	3	3	B	B

eine Bremsung durchführt. Wenn diese Systeme nicht kooperativ eingreifen, kann der Effekt der Trefferlagenänderung des Stoßenden durch den gleichzeitigen Eingriff des Gestoßenen kompensiert und sogar überkompensiert werden.<sup>120</sup> Im ersten Fall ergibt sich damit wahrscheinlich eine Trefferlage, die nahe an der ursprünglichen Trefferlage ist – mit zwei Abweichungen. Zum einen haben beide Fahrzeuge Geschwindigkeit abgebaut und zum anderen ist das gestoßene Fahrzeug nahe am maximalen Kraftschlusspotenzial seiner Reifen und stützt sich daher in der Kollision weniger darüber ab. Beide Effekte begünstigen eine geringere Verletzungsschwere. Im Falle, dass das gesto-

<sup>120</sup>Franke (2014, insbesondere Abschnitt 6.3 und 10.1) beschreibt wie „kooperative Absprachen“, unter denen er die „gemeinschaftliche Entwicklung von Lösungsstrategien in Konfliktsituationen“ versteht, für Sicherheitsfunktionen, zum Beispiel zur Kollisionsvermeidung, verwendet werden können.

ße Fahrzeug die Trefferlagenänderung überkompensiert, verschiebt diese sich nach vorne. Im Extremfall kann es dabei zu einem Rollentausch kommen und das ursprünglich stoßende Fahrzeug wird seitlich im Vorderwagen getroffen. Eine Übersicht ist in Tabelle A.7 für den Fall normaler Auslösungen exemplarisch abgebildet.

**Anforderung 16 (Überprüfung bestehender Systeme)** *Im Zuge der fortschreitenden Automatisierung von Fahraufgaben ist zu untersuchen wie sich neue Funktionen auf schon im Markt befindliche Systeme auswirken. Gegebenenfalls müssen bestehende Funktionen modifiziert oder sogar deaktiviert werden.*

Es muss kritisch angemerkt werden, dass die Qualität der Ergebnisse dieser Art der Bewertung nicht besser sein kann als die Qualität der zur Verfügung stehenden Informationen. Nach der vorliegenden Bewertung ergibt sich der größte Nutzen mit dem geringsten Gefahrenpotenzial im Stadtbereich und auf den Ausfallstraßen. Daher sollte eine Systemgrenze bezüglich der maximalen Geschwindigkeit bei Auslösung im Bereich von 60 km/h liegen ( $60 \text{ km/h} \pm 10\%$ ). Damit ist für alle Beteiligten sichergestellt, dass durch einen Eingriff keine Trefferlagen auftreten können, die zu einer Verschlechterung der Verletzungsschwere führen, auch für den Fall, dass beide Fahrzeuge aktiv die Trefferlage beeinflussen.

**Anforderung 17 (maximale Geschwindigkeit  $v_{0,52} < 60 \text{ km/h}$ )** *Das System darf nur eingreifen, wenn vor dem Eingriff die eigene Geschwindigkeit  $v_{0,52}$  geringer als 60 km/h zzgl. maximal 10 % ist.*

Ferner muss sichergestellt werden, dass ein Systemeingriff nicht durch eine andere Funktion überlagert wird. Denkbar ist beispielsweise, dass ein Notbremssystem zum Frontalkollisionsschutz kurz vor dem Crash die Situation als Gefahrensituation klassifiziert und eine Gefahrenbremsung mit maximaler Verzögerung anfordert. Dabei könnten sich die Anforderungen an die Bremsen überlagern und anstatt einer Zielbremsung, um die Hinterachse zu treffen, wird stärker verzögert und das gestoßene Fahrzeug im Bereich des Hinterwagens getroffen.



**Anforderung 18 (Eindeutigkeit der Systemauslösung)** *Das System muss exklusiven Zugriff auf die verwendete Aktorik haben, um auszuschließen, dass sich verschiedene Anforderungen überlagern.*

Zusammenfassend ergibt sich in Abhängigkeit der verwendeten Aktorik und mit den genannten Einschränkungen bzw. Möglichkeiten zur Reduktion der ASIL eine Einstufung von ASIL A für einen Eingriff, der nur auf Bremsung basiert und von ASIL B für einen Eingriff, der auf Bremsung und Lenkung basiert. Dies gilt allerdings nur, wenn die getroffenen Einschränkungen (s.o.) berücksichtigt werden. Unter der Annahme, dass sich die Bewertung für die Exposition und die Kontrollierbarkeit nicht deutlich ändert, ist die medizinische Verletzungsschwere maßgeblich für die Bewertung. Der S-Wert hängt von der angenommenen passiven Sicherheit und der Geschwindigkeit der Fahrzeuge ab. Durch die Einschränkung des Handlungskonzepts (in Form der formulierten Anforderungen) und einer kontinuierlichen Trefferlagenüberwachung können die Eingriffe auf Fälle beschränkt werden, in denen der Eingriff zu einer Verbesserung beiträgt, zumindest jedoch keine Verschlechterung im Vergleich zum Unfall ohne System eintritt.

## 3.5 Rechtliche Randbedingungen

Die rechtlichen Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem und an dessen Entwicklung gliedern sich in drei wesentliche Bereiche: Verhaltensrecht, Typzulassung und Produkthaftung. Ein System muss sowohl zivilrechtlichen als auch öffentlich-rechtlichen Aspekten aus dem Verhaltensrecht genügen. Für die Typzulassung zum Straßenverkehr ergeben sich in Deutschland und Europa zusätzliche Aspekte aus den EG Richtlinien bzw. ECE Regelungen. Darüber hinaus müssen insbesondere im Hinblick auf die Produkthaftung, die sich am Stand der Wissenschaft und Technik<sup>121</sup> bezüglich der Produkter-

---

<sup>121</sup> Klindt & Handorn (2010) weisen darauf hin, dass der Stand der Wissenschaft nicht zwingend gleichzusetzen ist mit der einer Branchenüblichkeit. Die Lücke zwischen technisch und wissenschaftlich überlegenen Sicherheitskonzepten einerseits und praktischer, für den Hersteller zumutbarer, Serienreife andererseits ist teilweise gravierend. Die Anforderungen, bedingt durch Entwicklungsdauer, ganzheitliche Kundenerwartung an ein Produkt hinsichtlich Bedienbarkeit und Komfort sowie der daraus resultierenden wirtschaftlichen Zumutbarkeit, sind

wartung orientiert, die jeweils gültigen Normen und Standards berücksichtigt werden. Je nach Hersteller ergeben sich bei der Umsetzung möglicherweise weitere Anforderungen.<sup>122</sup>

Die Rechtsfolgen der fortschreitenden Automatisierung, insbesondere für teil- und vollautomatisches Fahren, sind derzeit noch nicht abschließend geklärt.<sup>123</sup> Diese rechtliche Unsicherheit ist vor dem Hintergrund zu verstehen, dass sich die Möglichkeiten zur Automatisierung in den letzten Jahren sehr viel schneller weiterentwickelt haben, als zum Zeitpunkt der Konzeption von gesetzlichen Vorgaben voraussehbar war.

Durch die zunehmende Automatisierung der Fahraufgabe entsteht ein Paradigmenwechsel. Die volle Kontrolle der Fahraufgabe wird nicht wie bisher stets allein durch den Fahrzeugführer ausgeübt. Dies betrifft vorrangig Systeme zum teil- bzw. vollautomatischen Fahren. Gleichwohl steigen die Eingriffsmöglichkeiten für Fahrerassistenzsysteme<sup>124</sup>, sodass beim Entwurf neuer Systeme genau überprüft werden muss, ob bestehende rechtliche Einschätzungen noch zutreffend sind.<sup>125</sup>

---

schwer zu objektivieren und müssen stets gegeneinander abgewogen werden. Dieser Betrachtungsweise folgend könnte man daher auch von einem Stand der Technik, mit dem Fokus auf der praktischen Realisierbarkeit auf der einen Seite und einem Stand der Wissenschaft, als Menge aller denkbaren Lösungen auf der anderen Seite, sprechen.

<sup>122</sup>Anforderungen aus dem Kontext des Versicherungsrechts werden im Folgenden bewusst nicht betrachtet, da sich diese zum einen an konkreten Produkten orientieren und zum anderen den vertraglichen Absprachen zwischen den Versicherungspartnern unterliegen.

<sup>123</sup>Vergleiche den Schlussbericht der BAST-Projektgruppe zu den Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung (Gasser et al. 2012).

<sup>124</sup>Für das eigene Fahrzeug steigen die Eingriffsmöglichkeiten, insbesondere durch eine verbesserte und umfangreichere maschinelle Wahrnehmung und sich der damit ergebenden verbesserten Verkehrsszeneninterpretation, die beispielsweise eine detailliertere Bewertung der Verkehrsszene erlaubt und damit eine Kritikalitätsabschätzung verbessert. Weiterhin ergeben sich für andere Fahrzeuge möglicherweise stabilere bzw. weniger erratische Fahrttrajektorien, beispielsweise durch Spurhalteassistenten mit Fahrstreifen Mittelführung oder geringere Beschleunigungsveränderungen, ausgelöst beispielsweise durch frühzeitige Verkehrszeichenerkennung und entsprechende Warnungen oder Systeme zur Optimierung der ökologischen Fahrweise.

<sup>125</sup>Die hier vorgenommene rechtliche Einschätzung ergab sich unter anderem aus der Kooperation mit den Experten der BAST im Rahmen des EU-Projekts *interactIVe*. Mein besonderer Dank dafür geht an Tom Michael Gasser und Daniel Westhoff für die externe Einschätzung und

Es ist nicht Ziel dieser Arbeit alle Anforderungen für die rechtlich abgesicherte Entwicklung eines marktreifen Fahrerassistenzsystems zu erläutern. Die Trefferlagenänderung, ausgelöst durch Bremsen und möglicherweise Lenken, ist allerdings eine Neuerung<sup>126</sup>, die den Umfang bisheriger Systeme zur Unfallfolgenminderung übersteigt und insbesondere mit dem Lenken einen neuen Aspekt einführt, auch wenn eine Trefferlagenänderung statt durch Lenken auch durch Bremsen ausgeführt werden kann. Für die in Deutschland gültigen Rahmenbedingungen wird diese neue Funktion im Folgenden anhand der in Tabelle 3.8 angegebenen Gesetze, Verordnungen, Normen und Standards betrachtet.

#### 3.5.1 ECE-Homologation

Die Typzulassung erfolgt in Deutschland nach dem erstmals 1958 getroffenen und 1995 geänderten Übereinkommen der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE)<sup>127</sup>. Dabei wird jedes Teilsystem oder ein ganzes Fahrzeug anhand der sogenannten ECE-Regelungen zugelassen.<sup>128</sup> Für automatisch eingreifende Systeme sind die ergänzenden Regelun-

---

diesbezügliche Diskussion. Die Kerngedanken finden sich unter anderem in (Seiniger et al. 2012).

<sup>126</sup>Der Vollständigkeit halber muss angemerkt werden, dass ESC Eingriffe im Unfallgeschehen auch einen Trefferlagenänderungseffekt produzieren. Zum Beispiel wird im Alleinunfall der Schleuderunfall mit seitlicher Baumkollision entweder verhindert oder in einen Unfall mit frontaler Small-Overlap Baumkollision überführt. Diese Verschiebung ist dabei nicht das explizite Ziel, sondern vielmehr das Ergebnis eines Eingriffs in Gefahrensituationen, bei denen das Fahrzeug trotz Eingriffs kollidiert. Im weitesten Sinne handelt es sich damit auch um einen Eingriff mit einer resultierenden Trefferlagenänderung. Bei der Einführung des Systems war dies jedoch nicht absehbar. Das Ziel war die Verhinderung von Schleuderunfällen bzw. deren Reduktion. Die Bedeutung der geänderten Anschlusskonfiguration wurde erst im Rahmen der Beurteilung der Feldeffektivität sichtbar (Brumelow & Zuby 2009).

<sup>127</sup>Vergleiche (E/ECE/324/Rev.2(1995)) zum Übereinkommen über die Annahme einheitlicher technischer Vorschriften für Radfahrzeuge.

<sup>128</sup>Nationale Zulassungen können den nicht definierten Rahmen erweitern. In Deutschland regelt dies § 21a der StVZO.

**Tabelle 3.8:** Betrachtete Gesetze, Verordnungen, Normen und Standards zur Analyse der rechtlichen Anforderungen

Art	Bezeichnung	Jahr
Typzulassung	E/ECE/324/Add. 79 (ECE R79)	2006
	E/ECE/324/Add. 13H (ECE R13-H)	2010
	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)	2013
Verhaltensrecht	(Wiener) Übereinkommen über den Straßenverkehr (WÜ-StV)	1968
	Straßenverkehrsordnung (StVO)	2013
Haftungsrecht	Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG)	2002
	Straßenverkehrsgesetz (StVG)	2013
Normen und Standards	Code of Practice: Entwicklung und Validierung von ADAS (CoP-ADAS)	2009
	Road Vehicles - Functional Safety (ISO 26262)	2011
	Frontalkollisionsschutzsysteme (ISO 15623)	2013

gen zu Bremssystemen ECE R13-H<sup>129</sup> und die Regelungen zu Lenksystemen ECE R79<sup>130</sup> relevant.

### **ECE R13-H - Bedingungen für die Genehmigung der Bremsanlage**

Die Typzulassung betrachtet die Teilsysteme eines Fahrzeugs beschränkt auf die jeweiligen Bauteile und nicht im Hinblick auf höherwertige Funktionen. Daher werden automatische Bremseingriffe auch nicht gesondert durch die Typzulassung geregelt, sondern als zusätzliche Funktionen des Bremssystems

---

<sup>129</sup>Vergleiche E/ECE/324/Add.13H (2010) zu den einheitlichen Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen.

<sup>130</sup>Vergleiche E/ECE/324/Add.79 (2006) zu den einheitlichen Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage.

behandelt. Im Vergleich zu Notbremssystemen für den Längsverkehr ergibt sich folglich auch kein Unterschied bei den Anforderungen.<sup>131</sup> Daher ist das vorgeschlagene System bezüglich der Bremsengriffe zulassungsfähig, wenn die Funktion bei der Typzulassung deklariert ist und die Bremsleuchten sowie eine Kontrollleuchte für den Fahrer gemäß der Anforderungen aus Regelung 13-H aktiviert werden (Seiniger et al. 2012, Abschnitt 3.1.2).

#### **ECE R79 - Bedingungen für die Genehmigung der Lenkanlage**

Ein automatischer Lenkeingriff ist aufgrund der Regelung 79 zum „Folgen einer bestimmten Fahrspur, beim Rangieren bei niedrigen Geschwindigkeiten“<sup>132</sup> nur bis 10 km/h ( $\pm 20\%$ )<sup>133</sup> zulässig. Im Gegensatz zum Bremsen ist bei höheren Geschwindigkeiten nur eine kurzzeitige „korrigierende Lenkfunktion [...], damit die gewünschte Richtungsbahn des Fahrzeugs eingehalten oder das dynamische Verhalten des Fahrzeugs beeinflusst wird“<sup>134</sup> zulässig. Weiterhin werden Lenkeingriffe von Fahrerassistenzsystemen nur zugelassen, wenn die Funktion keine Verschlechterung des Lenkverhaltens verursacht und jederzeit durch den Fahrer gezielt übersteuert werden kann.<sup>135</sup>

Ob die Trefferlagenänderung im Falle einer unvermeidbaren Kollision der gewünschten Richtungsbahn des Fahrzeugs entspricht, muss in Zusammenarbeit mit den Zulassungsbehörden geklärt werden (Seiniger et al. 2012, Kapitel 4.11). Auch die aus der Trefferlagenänderung resultierende mögliche Erhöhung der Fahrstabilität nach der Kollision kann in diesem Zusammenhang diskutiert werden.<sup>136</sup> Eine gezielte Anpassung der Zulassungsregelung

---

<sup>131</sup>Die jeweils angeforderten Bremsengriffe müssen den gleichen Anforderungen wie beispielsweise ein ESC-System genügen. Vergleiche Abschnitt 5.1 zu allgemeinen Anforderungen und Abschnitt 5.2 zu den Eigenschaften der Bremssysteme in E/ECE/324/Add.13H (2010).

<sup>132</sup>Vergleiche Abschnitt 2.3.4.1 E/ECE/324/Add.79 (2006).

<sup>133</sup>Vergleiche Abschnitt 5.1.6.1 E/ECE/324/Add.79 (2006).

<sup>134</sup>Vergleiche Abschnitt 2.3.4.2 E/ECE/324/Add.79 (2006).

<sup>135</sup>Vergleiche Abschnitt 5.1.6 E/ECE/324/Add.79 (2006).

<sup>136</sup>Lenkeingriffe können im Grenzbereich der Fahrstabilität auch zur Stabilisierung des Fahrzeugs beitragen (Richter & Köhn 2012, Abschnitt 29.4.1). Ob ein Lenkeingriff zur Trefferlagenänderung allerdings in diesem Grenzbereich ausgelöst wird, ist fraglich. Für ein Fahrzeug, das fahrstabilisierende Lenkeingriffe über ein anderes System auslöst, muss das Zusammenspiel der Funktionen vor der Kollision näher untersucht werden, um sicherzustellen, dass keine ungeplante Überlagerung der Aktorikeingriffe stattfindet.

scheint die beste Lösung zu sein. Diese Änderungen sind, wie beispielsweise für die automatischen Einparkassistenten vorgenommen, ein gangbarer Weg, der in überschaubaren Zeiträumen durchgeführt werden kann.

**Anforderung 19 (Zulassungsfähigkeit)** *Für die Typzulassung der Lenkeingriffe erscheint es erforderlich, die gesetzlichen Grundlagen der ECE R79 im Hinblick auf die Einstufung des Systems zu überprüfen oder die Regelungen für Geschwindigkeiten über 10 km/h ( $\pm 20\%$ ) zu erweitern.*

### 3.5.2 Verhaltensrechtliche Bewertung

Verhaltensrechtliche Anforderungen und Verpflichtungen basieren auf dem international von 70 Staaten ratifizierten WÜ-StV von 1968 (UN 1968).<sup>137</sup> Zur Umsetzung sind die dort vereinbarten Grundsätze in Europäische Richtlinien insbesondere zur Typzulassung (s.o.) und in nationales Verkehrsrecht eingeflossen. Aus dem WÜ-StV ergibt sich die Pflicht für den Fahrer zu jeder Zeit die Kontrolle über das Fahrzeug auszuüben.<sup>138</sup> Gleichzeitig muss er jederzeit die Verkehrssituation überwachen, sich angemessen vorsichtig verhalten sowie gegebenenfalls übersteuernd eingreifen.<sup>139</sup> Umgesetzt in deutsches

---

<sup>137</sup>Nach Ausarbeitung des folgenden Abschnitts wurden Ergänzungen des Art. 8 und des Art. 39 der WÜ-StV durch die Arbeitsgruppe WP.1 der UNECE empfohlen (ECE/TRANS/WP.1/145 2014). Diese Änderungen betreffen den Aspekt der Zulassungsfähigkeit von Fahrerassistenzsystemen. Im Hinblick auf die Forderung, dass der Fahrer jederzeit die Kontrolle über das Fahrzeug ausüben können muss, sollen zukünftig Möglichkeiten zur Zulassung geschaffen werden, wenn diese Systeme im Einklang mit bestehenden Rechtsvorschriften stehen oder wenn diese Systeme übersteuerbar bzw. abschaltbar ausgeführt werden. Die bisher geforderte Kontrolle durch den Fahrer, die beispielsweise im Widerspruch zum automatischen Fahren stand, ist damit nicht mehr notwendig. Für die Einschätzungen in diesem Abschnitt ergeben sich nach der zukünftigen Übernahme in nationales und internationales Recht vermutlich keine Änderungen, da die Übersteuerbarkeit (der vorgestellten Funktion) hier bereits vor diesen Ergänzungen gefordert wurde. Inwiefern für Noteingriffe in Gefahrensituationen zukünftig eine Übersteuerbarkeit gefordert wird, ist damit vorallem Inhalt einer ethischen Diskussion (Vergleiche Abschnitt 3.6).

<sup>138</sup>Art. 8 Abs. 5 WÜ-StV: „Every Driver shall at all times be able to control his vehicle“.

<sup>139</sup>Art. 13 Abs. 1 WÜ-StV: „Every driver shall in all circumstances have his vehicle under control so as to be able to exercise due and proper care and to be at all times in a position to perform all maneuvers required of him“.

Verkehrsrecht ergibt sich damit die Pflicht des Fahrzeugführers die Geschwindigkeit zu jeder Zeit uneingeschränkt zu beherrschen und daraus abgeleitet eine jederzeit mögliche Übersteuerbarkeit eines automatischen Eingriffs (Gelau et al. 2012, Abschnitt 3.4).

Gelau et al. (2012, Abschnitt 3.4) merken bereits kritisch an, dass diese Vorgaben schon für heutige Seriensysteme wie ABS, ESC und Traktionskontrolle nicht unbedingt erfüllt sind. Für sie ergibt sich daraus kein grundsätzlicher Widerspruch, vielmehr geht es ihnen um die Vermeidung des Szenarios, dass Systeme zulassungsfähig aber nicht mit dem Verhaltensrecht vereinbar wären. Sie argumentieren daher für die genannten Systeme, dass diese die Fahrstabilität erhöhen und damit dem Fahrerwillen entsprechen, da sie beispielsweise versuchen seine Lenkwinkelvorgaben bestmöglich umzusetzen. Dieser Sichtweise kann man auch widersprechen. Ob für einen geübten Fahrer ein entsprechend übersteuerndes Fahrzeug nicht besser am Limit durch eine Kurve mit unterschiedlichen Reibwerten gefahren werden kann? Insbesondere da ESC und Traktionskontrolle (wenn überhaupt) nur durch vorheriges Ausschalten übersteuert werden können.<sup>140</sup>

Um dem Fahrer die Gelegenheit zu geben auf eine Gefahrensituation angemessen zu reagieren, sollte daher eine Warnung so früh wie möglich erfolgen. Die Frage, inwiefern in einer Gefahrensituation das Fahrzeug noch beherrscht werden kann, kann aus der Reaktion des Fahrers abgeleitet werden. Reagiert der Fahrer auf eine Warnung oder einen Eingriff bei einer unmittelbar bevorstehenden Kollision mit einer Handlung, die in Richtung Unfallvermeidung oder Folgenminderung zielt, sollte diese Handlung bestmöglich unterstützt werden. Dies kann bei einem Bremseneingriff durch den Fahrer in Form einer zusätzlichen Erhöhung des Bremsdrucks erfolgen bzw. bei starken Lenkmanövern durch ein Deaktivieren der vom System ausgelösten Bremsung. Im Fall einer starken Beschleunigung durch den Fahrer sollte jeglicher System-

---

<sup>140</sup>Weitere Beispiele sind: a) Eine  $\mu$ -split Situation (niedriger Reibwert auf nur einer Seite des Fahrzeugs), bei der ein ABS zwar einen Dreher und potenzielles Schleudern verhindern kann, gleichzeitig aber die Bremswirkung drastisch reduziert und damit beispielsweise zu einer fast ungebremsten Auffahrsituation führt und b) Eine Gefahrensituation, bei der sich ein anderes Fahrzeug nähert und Kollisionsgefahr besteht, in der die Traktionskontrolle ein Anfahren bei Straßenverhältnissen mit niedrigem Reibwert derart stark unterdrückt, dass es nicht möglich ist sich aus dem Stand so schnell zu entfernen, wie dies beispielsweise trotz durchdrehender Reifen möglich wäre.

eingriff abgebrochen werden, da es sich um eine übersteuernde Handlung des Fahrers bei einer Fehlauflösung handeln kann. Reagiert der Fahrer nicht, kann man davon ausgehen, dass ein Eingriff Wille des Fahrers ist (Frenz et al. 2009).

Dieser zweite Fall dürfte, wenn eine Kollision in weniger als einer Sekunde bevorsteht, wesentlich häufiger gegeben sein. Damit stellt sich die Frage analog zur verhaltensrechtlichen Zulässigkeit von ESC, ob nicht auch hier im Sinne des Fahrerwillens durch ein System zur Unfallfolgenminderung gehandelt werden kann. Und ob für diesen Fall ein übersensibles Interpretieren der Fahrerhandlung und ein sofortiges Abbrechen wirklich zwingend notwendig sind? Die Merkmale des Eingriffs und die Trefferlagenänderung der Anschlusskonfiguration sind jedenfalls ähnlich zu denen von ESC Eingriffen mit anschließender Kollision.<sup>141</sup>

Seiniger et al. (2012, Kapitel 5.1) gehen explizit auf die Vereinbarkeit eines automatischen Lenkeingriffs mit Artikel 14<sup>142</sup> des WÜ-StV ein<sup>143</sup> und betonen, dass dessen Artikel auch im Zusammenspiel und Gesamtbild zu sehen sind. Insbesondere vor dem Hintergrund eines plötzlichen Eingriffs in Gefahrensituationen ist die tatsächlich stattfindende Beherrschbarkeit durch den Fahrer, wie oben beschrieben, grundsätzlich in Frage zu stellen. Für generell unbeherrschbare Situationen<sup>144</sup>, die in keiner anderen Weise als durch den automatischen Eingriff wenigstens teilweise verbessert werden können bzw. durch das System noch beherrschbar sind, scheint es sinnvoll die Vorgaben des WÜ-StV gegeneinander abzuwägen. Vor dem Hintergrund, dass Arti-

---

<sup>141</sup>Eine weitere grundlegende Frage dabei ist, wie der Fahrer durch die Systemeingriffe im Hinblick auf Missbrauch und Übung zur Übersteuerung konditioniert wird. Im Falle von ESC verschiebt sich die Grenze, vom Normalfahrer kaum zu bemerken, bei schnellen Kurvenfahrten in Richtung des physikalischen Maximums und fördert möglicherweise einen sportlicheren Fahrstil. Dagegen führen häufiges Auslösen der Warn- und Eingriffsstufen einer Notbremsfunktion möglicherweise zu einer bewussteren und defensiveren Fahrweise. Zu häufiges Warnen führt wiederum dazu, dass die Nutzer das System abschalten bzw. abschalten lassen.

<sup>142</sup>Art. 14 Abs. 1 WÜ-StV: „Any driver wishing to perform a maneuver [...] shall first make sure that he can do so without risk of endangering other road-users travelling behind or ahead of him or about to pass him, having regard to their position, direction and speed“.

<sup>143</sup>Vergleiche auch die daraus abgeleiteten Vorschriften: § 7 Abs. 5 StVO und § 9 Abs. 1 StVO.

<sup>144</sup>Beispielsweise vor einer unvermeidbaren Kollision.



kel 7<sup>145</sup> sicherlich übergeordnet zu sehen ist, erscheint daher eine Handlung, die nur eine geringe Beherrschbarkeit durch den Fahrer zulässt aber versucht Schaden von allen Beteiligten abzuwenden, als sinnvoll. Analog dazu kann man den Bremsengriff zur Trefferlagenänderung im Querverkehr auch als eine Art Lenkeingriff sehen.<sup>146</sup>

Für die heutige Auslegung ist eine Übersteuerbarkeit damit gelebte Praxis und wird als unvermeidlich betrachtet. Für die Zukunft und bei zunehmender Automatisierung des Fahrens sollte für schwer zu kontrollierende Gefahrensituationen explizit diskutiert werden, wie ein automatischer Systemeingriff aussehen muss, der nicht übersteuert werden kann, weil er analog zum ESC für die Mehrheit der Situationen und Fahrer dem Fahrerwillen entspricht. Mit einem Paradigmenwechsel ergäben sich nicht nur hinsichtlich der Übersteuerbarkeit, sondern auch im Hinblick auf frühere Eingriffszeitpunkte erhebliche Potenziale zur Unfallvermeidung und -folgenminderung. Eine weitere Möglichkeit wäre gezielt einen Fahrmodus auszuwählen, der die für den Fahrer zur Verfügung stehende Fahrdynamik begrenzt und eine Eingriffsgrenze festlegt. Wird die definierte Grenze überschritten, beispielsweise wenn in einer Gefahrensituation ein Ausweichen nur oberhalb der festgelegten Querbesehleunigung möglich ist, kann ein Assistenzsystem automatisch eingreifen, da dieser Grenzbereich an das System delegiert wurde und damit dem Fahrerwillen entspricht. Ein möglicher Zwischenschritt wäre die benötigte Übersteuerbarkeit nicht auf einen Wert festzulegen sondern in Abhängigkeit der Kritikalität bzw. der Geschwindigkeit, mit der die Eskalationsstufen durchlaufen werden, zu skalieren. Eine hohe Kritikalität würde dann deutlichere Reaktionen vom Fahrer zur Übersteuerbarkeit erfordern. Werden die Eskalationsstufen langsam durchlaufen, mit langen Warnzeiten, wird die Übersteuerbarkeit ebenfalls schwieriger. Springt das System hingegen sehr schnell in eine hohe Stufe, womöglich direkt zum automatischen Eingriff, ist die Gefahr, dass es sich um eine Fehlauslösung (false-positive) handelt größer und die Übersteuerbarkeit wird erleichtert.

---

<sup>145</sup> Art. 7. Abs. 1 WÜ-StV: „Road-users shall avoid any behaviour likely to endanger or obstruct traffic, to endanger persons, or to cause damage to public or private property“.

<sup>146</sup> Insbesondere für Geschwindigkeiten des gestoßenen Fahrzeugs über 30 km/h.

**Anforderung 20 (Übersteuerbarkeit)** *Nach heutigem Stand sollten alle Eingriffsformen durch den Fahrer übersteuert werden können. Lenkeingriffe sollten erst bei Unvermeidbarkeit einer Kollision vom System ausgeführt werden.*

### 3.5.3 Zivilrechtliche Bewertung

Die allgemeingültigen Anforderungen bezüglich des Produkthaftungsrechts, Vertragsrechts, Deliktsrechts und Produktsicherheitsrechts unterscheiden sich nicht von denen anderer Fahrerassistenzsysteme. Eine Einschätzung der resultierenden Implikationen aus der Europäischen Richtlinie zur Produkthaftung für Fahrerassistenzsysteme<sup>147</sup> findet sich in Seiniger et al. (2012, Abschnitt 5.2). Für das hier vorgestellte System ergeben sich keine anderen oder zusätzlichen Einschränkungen. Analog zum Verhaltens- und Haftungsrecht erscheint es jedoch ratsam, die Möglichkeit zum Übersteuern der automatischen Lenkeingriffe durch den Fahrer sicherzustellen. Darüber hinaus sollte das System so ausgelegt sein, dass eine Erhöhung der Unfallschwere<sup>148</sup> für jede beteiligte Person<sup>149</sup> ausgeschlossen wird, um etwaige Ansprüche gegen den Fahrer und Fahrzeughalter auszuschließen (Seiniger et al. 2012, Abschnitt 5.5.3).<sup>150</sup>

### 3.5.4 Haftungsrechtliche Bewertung

Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem ergeben sich zwangsläufig aus der Fragestellung, wer für mögliche Schäden aufkommen muss und inwiefern diese bei der Entwicklung und Auslegung berücksichtigt werden müssen. Ex-

---

<sup>147</sup>Vergleiche RL 85/324/EWG.

<sup>148</sup>Zivilrechtlich wird nicht nur die medizinische Unfallschwere, sondern der gesamte Schaden betrachtet.

<sup>149</sup>Zusätzlich müssen neben den Personen noch alle Gegenstände, die beschädigt werden, betrachtet werden.

<sup>150</sup>Vergleiche auch die ethische und moralische Betrachtung zu dieser Fragestellung in Abschnitt 3.6.

emplarisch soll auf die Haftung des Fahrzeughalters, Fahrzeugführers und des Herstellers eingegangen werden.<sup>151</sup>

#### **Haftung des Fahrzeughalters und Fahrzeugführers**

##### **§ 7 Abs. 1 StVG**

*Wird bei dem Betrieb eines Kraftfahrzeugs [...] ein Mensch getötet, der Körper oder die Gesundheit eines Menschen verletzt oder eine Sache beschädigt, so ist der Halter verpflichtet, dem Verletzten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen.*

Demnach haftet der Halter für alle Schäden die aus dem Gebrauch des Fahrzeugs, auch bei ordnungsgemäßer Nutzung, entstehen. Daher ist der Halter im Rahmen des Pflichtversicherungsgesetzes (§ 1 PflVersG) verpflichtet diese Haftungsansprüche zu versichern. Da der Nutzen von Fahrerassistenzsystemen in seiner Gesamtheit positiv eingeschätzt wird und mögliche negative Auswirkungen überkompensiert werden, ist davon auszugehen, dass eine Versicherung dieser Systeme grundsätzlich möglich ist.<sup>152</sup>

§ 18 Abs. 1 StVG bestimmt, dass der Fahrzeugführer für Schäden haftbar gemacht werden kann, allerdings nur, wenn er sie auch verschuldet hat. Kann er jedoch nachweisen, dass er kein Verschulden an einem schadhafte Ereignis hat, beispielsweise indem er ein gesetzeskonformes Verhalten vor einem Unfall nachweist und belegen kann, oder dass er den Instruktionen des Herstellers redundant gefolgt ist, muss er nicht haften. Dies gilt zum Beispiel

---

<sup>151</sup>Nicht betrachtet werden Aspekte, die für den Produkteinsatz relevant sind und die sich aus Instruktions-, Fabrikations- und Zuliefererfehlern ergeben.

<sup>152</sup>Der Verband der Unfallversicherer beurteilte in dieser Hinsicht die bisher verbreiteten Assistenzsysteme, wie beispielsweise Spurhalte- und Notbremsassistenten. Hummel et al. (2011) geht davon aus, dass die Reduktion der Unfälle und der Unfallschweren (durch die Systeme) zu einer Reduktion der insgesamt zu regulierenden Schadenshöhe führt. Schäden, die durch Fehler der Systeme auftreten, werden durch die insgesamt sinkende Schadenshöhe überkompensiert. Immer notwendiger wird es dafür in Zukunft abzuwägen wie nicht reversible Maßnahmen (z.B. pyrotechnische Gurtstraffer) zur medizinischen Unfallschwerereduktion in Relation zu den anfallenden Reparaturkosten zu betrachten sind. Ziel sollte es sein nur Maßnahmen auszulösen, die im direkten Zusammenhang mit der Unfallschwerereduktion der beteiligten Personen stehen. Daher könnte man beispielsweise Gurtstraffer nur für verwendete Gurte auslösen.

wenn der Beweis geführt werden kann, dass ein Unfall durch einen technischen Defekt oder fehlerhafte Instruktionen entstanden ist.

Zusammenfassend leiten sich aus den Haftungsaspekten der Fahrzeughalter und -führer keine über die für heutige Fahrerassistenzsysteme hinausgehenden Anforderungen für das hier behandelte System ab, da das System regulär nur in einer Gefahrensituation eingreift und dabei die Unfallfolgen mindert oder zumindest nicht erhöht.

## **Haftung des Herstellers**

### **§ 1 Abs. 1 ProdHaftG**

*Wird durch den Fehler eines Produkts jemand getötet, sein Körper oder seine Gesundheit verletzt oder eine Sache beschädigt, so ist der Hersteller des Produkts verpflichtet, dem Geschädigten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen.*

Ähnlich wie der Fahrzeughalter, haftet der Hersteller für Schäden, die durch Fehler in seinen Produkten entstehen. Im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen muss genau überlegt werden wie diese Fehler aussehen könnten und welche Systemgrenzen gelten. § 3 Abs. 1 ProdHaftG definiert einen Fehler im Produkt „wenn dieses nicht die Sicherheit bietet, [...] die berechtigterweise erwartet werden kann“. Dabei wird unterschieden zwischen Konstruktions-<sup>153</sup>, Fabrikations-<sup>154</sup> und Instruktionsfehlern<sup>155</sup>. Konstruktive Sicherheitsvorkehrungen sind nach Klindt & Handorn (2010) vorrangig gegenüber Instruktionsfehlern zu behandeln. Da die Fabrikation des Fahrzeugs in dieser Arbeit keine Rolle spielt und die Instruktion abhängig von der finalen Umsetzung ist, werden im Folgenden nur die Konstruktionsfehler näher betrachtet.

---

<sup>153</sup>Fehler beim Entwurf oder der Konstruktion, die zur Gefährdung führen können. Klindt & Handorn (2010): „Fehlfunktionen eines Sicherheitssystems müssen in den Grenzen des (1) technisch Möglichen und (2) wirtschaftlich Zumutbaren konstruktiv ausgeschaltet werden“.

<sup>154</sup>Fehler, die bei der Herstellung zur Gefährdung führen können.

<sup>155</sup>Fehler, die bei der Einweisung sowie Produkt- und Funktionsbeschreibung zur Gefährdung führen können. Klindt & Handorn (2010): Den Herstellern werden dabei „Warn- und Verhaltenshinweise abverlangt“ die eine „reelle Möglichkeit zur effektiven Gefahrensteuerung durch den instruierten Nutzer“ tatsächlich erlauben („Beachtbarkeit der Instruktionen“).

Grundsätzlich problematisch an der o.g. Definition ist die Frage, wie die „berechtigterweise zu erwartende Sicherheit“ zu interpretieren ist. Da Notbremssysteme an der Kreuzung bisher praktisch nicht existent sind, erscheint es schwierig bzw. unmöglich eine allgemeingültige Erwartungshaltung der Fahrer an das System zu formulieren. Für den Fall der Auslösung in einer Gefahrensituation erscheint es zunächst plausibel, dass ein Verzögern des Fahrzeugs im Interesse des Fahrers ist, wenn sichergestellt werden kann, dass die Verzögerung nicht zu einer Erhöhung der Unfallfolgen eines der Beteiligten führt.<sup>156</sup> Ein Lenkeingriff zur Trefferlagenänderung ist dabei aus Nutzersicht womöglich weniger intuitiv, steht aber nicht grundsätzlich im Widerspruch zur Erwartungshaltung für den in der Gefahrensituation überforderten Fahrer, der eine Reduktion der Verletzungsschwere durch einen Systemeingriff erwartet.<sup>157</sup> Seiniger et al. (2012, Abschnitt 5.5.3) betonen allerdings, dass dabei sichergestellt werden muss, dass ein Eingriff für keinen am Unfall Beteiligten zu einer Erhöhung der Unfallschwere führt.

**Anforderung 21 (Veränderung der Unfallschwere)** *Es muss sichergestellt werden, dass ein automatischer Eingriff nicht zu einer Verschlechterung der medizinischen Unfallschwere für jeden einzelnen am Unfall Beteiligten führt.*

Anders sieht dies im Falle einer Fehlauflösung (false-positive) aus. Eine Fehlauflösung könnte nach ProdHaftG als Fehler im Produkt betrachtet werden. Möglichen negativen Folgen einer Fehlauflösung (insbesondere durch den Lenkeingriff) sollte daher konstruktiv begegnet werden. Seiniger et al. (2012, Abschnitt 5.5.2) sehen insbesondere durch die Möglichkeit zur Übersteuerung eine Lösung für den Fahrer negative Folgen abzuwenden. Dabei wird eine jedem Eingriff vorhergehende Warnung als wichtig angesehen. Diese gibt dem Fahrer vor einer Fehlauflösung mehr Zeit zur Reaktion auf den bevorstehenden Eingriff (Seiniger et al. 2012, Abschnitt 5.5.2).<sup>158</sup>

---

<sup>156</sup>Auch vor dem Hintergrund des grundsätzlichen Paradigmas, dass eine Verringerung der Geschwindigkeiten häufig mit einer Reduktion der Verletzungsschwere einhergeht oder diese Reduktion oftmals begünstigt.

<sup>157</sup>Vergleiche die Probandenevaluation in Abschnitt 5.2.

<sup>158</sup>Seiniger et al. (2012) diskutieren nicht die Fragestellung, ob eine Warnung vor dem Eingriff oder vor einer Gefahrensituation warnen soll. Dr. Clemens Grunert bezeichnet extrem kurz vor einem Eingriff ausgelöste Warnungen, als „feel-good warnings“. Diese dienen weder

Analog zur Diskussion der Übersteuerbarkeit kann der Zweck und Zeitpunkt der Warnung diskutiert werden. Ist eine Warnung vor einem Eingriff notwendig? Wenn ja, wie lange muss diese dann vor einem Eingriff erfolgen? So, dass 90 %<sup>159</sup> der Fahrer die Situation kontrollieren können? Wenn man diese Fragen mit ja beantwortet, gelangt man zu dem Punkt, dass sich eine Verkehrssituation, unabhängig von den zusätzlichen Limitierungen bei der Erkennung durch die maschinelle Wahrnehmung und Interpretation, schneller in eine Gefahrensituation entwickeln<sup>160</sup> kann, als Zeit benötigt wird um eine ausreichend lange Warnung auszugeben. Heutige Systeme durchlaufen in der Regel eine Eskalationskaskade<sup>161</sup>, entwickelt sich aber die Situation schneller als die Schwellwerte oder wird diese erst sehr spät als Gefahrensituation erkannt, wird mit jedem Verarbeitungsschritt eine neue Stufe erreicht. Eine Warnung erfolgt damit nicht mehr mehrere Sekunden, sondern nur wenige (<200) Millisekunden vor Auslösung eines automatischen Eingriffs. Ob es in diesem Fall sinnvoll ist eine Warnkaskade zu durchlaufen, die den Fahrer auf eine Gefahr aufmerksam macht, um eine Fahrerreaktion hervorzurufen, muss zumindest kritisch diskutiert werden. Ebenso sinnvoll erscheint es, analog zu den ohne vorherige Warnung erfolgenden ESC Eingriffen, über eine entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstelle den Fahrer zu informieren und den Eingriff für den Fahrer zu plausibilisieren, damit dieser im Falle einer Fehlauslösung besser und schneller befähigt wird das Fahrzeug (falls überhaupt möglich) zu übersteuern.

**Anforderung 22 (Warnung vor Eingriff)** *Es sollte versucht werden, den Fahrer frühestmöglich durch eine Warnung auf einen Eingriff vorzubereiten. In Situationen, in denen eine rechtzeitige Warnung nicht erfolgen kann, muss*

---

dazu den Fahrer auf eine Gefahrensituation aufmerksam und handlungsfähig zu machen noch dazu ihn auf die wenige Millisekunden später erfolgenden Eingriffe vorzubereiten bzw. das Fahrzeugverhalten zu plausibilisieren. Persönliche Kommunikation, Oktober 2013.

<sup>159</sup>90 % entspricht der Beherrschbarkeitsstufe C2 der ISO 26262 (2011), Abschnitt B.3: „90 % or more of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid harm“. Das RESPONSE III Projekt schlägt im Gegensatz dazu 85 % vor (Servel et al. 2006, Abschnitt 4.1).

<sup>160</sup>Beispielsweise durch eine Vollbremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs.

<sup>161</sup>Vergleiche Abschnitt 2.2.3. Systeme auf der Stabilisierungsebene (z.B. ESC) greifen jedoch ohne Eskalationskaskade direkt in das Fahrverhalten ein.

*der Fahrer entsprechend über einen Eingriff informiert werden, um diesen möglichst schnell für den Fahrer zu plausibilisieren.*

Die Vermeidung von Konstruktionsfehlern ist ein Spannungsfeld zwischen wirtschaftlich zumutbarer und technisch möglicher Fehlervermeidung im Produktprozess. Erforderlich sind Sicherungsmaßnahmen, die dem Stand der Wissenschaft und Technik entsprechen und einen ausreichenden Schutz vor Schäden bieten (Klindt & Handorn 2010).<sup>162</sup> Um unrealistische Anforderungen zu vermeiden, ist nach Klindt & Handorn (2010) eine Verobjektivierung<sup>163</sup> der Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Da diese in der juristischen Praxis aber im Einzelfall beurteilt werden, bleibt zu befürchten, dass die Hersteller eher vorsichtig bei der Einführung neuer Systeme vorgehen und damit das Gesamtsystem Fahrzeug möglicherweise langsamer ein neues Sicherheitsniveau erreicht, was dem Sinn und Gedanken des ProdHaftG eigentlich widerspricht. Derzeitiger Konsens bei Art und Umfang der Sicherungsmaßnahmen ist die Beachtung gültiger Normen und Standards. In diesem Sinne stehen auch die Bemühungen der Wissenschaft und Industrie, vergleiche beispielsweise Servel et al. (2006), eine gemeinsame Basis zu definieren.

#### **Anforderung 23 (Produktprozess nach Stand der Wissenschaft & Technik)**

*Es muss sichergestellt werden, dass im Produktentstehungsprozess Sicherungsmaßnahmen nach dem Stand der Wissenschaft & Technik benutzt werden, um Fehler im Produkt zu vermeiden.*

---

<sup>162</sup> Bewersdorf (2005, § 4 Abs. B.I.2.a)aa)) weist darauf hin, dass diese notwendig sind, aber nicht hinreichend sein müssen.

<sup>163</sup> Klindt & Handorn (2010): „Der Rechtsprechung obliegt es, den Herstellern praktisch umsetzbare und nicht zuletzt rechtssichere Maßstäbe für die einzuhaltenden Sicherheitsstandards vorzugeben [...] um die bei der Produktentwicklung relevanten Sicherheitsanforderungen antizipieren und intern kommunizieren zu können [um zu verhindern, dass] Sicherheitssysteme nicht zur Marktreife entwickelt [werden und damit] auch der angestrebte Verbraucherschutz auf der Strecke [bleibt]“.

## **3.6 Ethische Diskussion der Trefferlagenänderung**

Naab & Reichart (1998) postulieren: „Der Mensch wird grundsätzlich als schwächstes Glied in der Kette der zur Verkehrssicherheit beitragenden Faktoren gesehen und soll am besten durch technische Automaten ersetzt werden“. Dieser, von Naab als Automatisierungsansatz bezeichneten Richtung für die Entwicklung von Fahrerassistenz, stellt er eine zweite Richtung entgegen, bei der „der Mensch [...] als verantwortlich handelnde Person gesehen [wird], deren Zuverlässigkeit bei der Aufgabenerfüllung durch technische Systeme besser unterstützt werden muß“. Damit wirft Naab zwar keine direkte ethische Fragestellung auf, er zeichnet aber ein Bild der fortschreitenden Fahrzeugautomatisierung, bei der man sich entscheiden muss zwischen dem reinen Unterstützen oder dem sukzessiven Ersetzen der menschlichen Anteile an der Fahrzeugführung. Naab & Reichart (1998) haben dabei die „Entschärfung fahrspezifischer Defizite“ im Sinn, wie sie beispielsweise bei der Fahrzeugstabilisierung durch ABS und ESC ermöglicht werden. Die Verantwortung dafür sehen sie weitestgehend beim Fahrer, der zuständig für Initiierung bzw. Überwachung des Fahrzeugs ist.<sup>164</sup> Nur für das automatische

---

<sup>164</sup>Inwiefern ein Fahrer auf den plötzlichen Ausfall von ABS reagieren kann, bzw. wie er dafür trainieren muss, lassen Naab & Reichart (1998) offen. Offensichtlich besteht für den Straßenverkehr im Gegensatz zur Luftfahrt ein anderer gesellschaftlicher Konsens, der eben nicht explizit fordert, dass der Autofahrer vergleichbar mit einem Piloten geschult ist. Piloten sind verpflichtet Gefahrensituationen auch bei plötzlichen Systemausfällen zu beherrschen und vor allem diese Situationen auch regelmäßig zu trainieren.

Auch bei der Reparatur und Instandsetzung existieren im Automobilbereich Anforderungen bezüglich regelmäßiger amtlicher Zertifizierung der Mechaniker, Mehr-Augen Prinzip bei Wartung und Inspektion sowie vorgeschriebene Intervallprüfungen, bei denen nach Vorgaben der Hersteller- und Aufsichtsbehörden Systeme in ihrer genauen Funktionsweise überprüft werden, nicht oder zumindest nicht in gleichem Umfang.

Heutige und zukünftige teilautomatische Funktionen werden im Rahmen der vorgeschriebenen Hauptuntersuchung entweder nur äußerlich oder, bei Vorhandensein von Prüfanschlüssen, nur auf Auffälligkeiten bzw. auf die Einhaltung von „Systemdaten“ bzw. „Vorschriften“ untersucht. Eine praktische Wirk- oder Funktionsüberprüfung, beispielsweise durch Vermessung von Sensoren und Aktoren, findet nicht statt. Die StVZO Anlage VIII (§ 29 Absatz 1.2.1) definiert eine Hauptuntersuchung gemäß „bekannt gemachter Richtlinien auf ihre Verkehrssicherheit, ihre Umweltverträglichkeit sowie auf Einhaltung der für sie geltenden Bau-



Fahren, bei dem ein System „Aktionsauswahl und -ausführung“ übernimmt, hat nicht der Fahrer, sondern das System die Verantwortung zu übernehmen (Naab & Reichart 1998).

Diese Sichtweise ist problematisch, da sie eine genaue Definition der Verantwortung für teilautomatische Funktionen verlangt. Um die Verantwortung tragen zu können, muss der Mensch in der Lage sein die Verkehrssituation zu bewerten. Dann kann er entweder entsprechend eingreifen und durch Übersteuerung der Funktion reagieren oder die Verantwortung (vorab) delegieren. Im ersten Fall entstehen dadurch weitreichende Konsequenzen bezüglich der Auslösezeitpunkte, um sicherzustellen, dass der Fahrer die Situation verstanden hat und die vom System vorgeschlagene Handlung akzeptiert. Im zweiten Fall muss eine klare Aufgabenbeschreibung und -trennung durchgeführt werden, was insbesondere bei unterstützenden (teilautomatischen) Funktionen, hinsichtlich der Eindeutigkeit, der notwendigen Zeiträume und der daraus resultierenden Funktionseinschränkung schwierig sein dürfte.

Aus der Verantwortung resultiert die Fragestellung nach dem Maßstab zur Bewertung der Handlungen. Ob ein System richtig oder falsch handelt, kann aus verschiedenen Sichtweisen betrachtet werden. Im folgenden Abschnitt werden einige Grundlagen der Roboter-Ethik<sup>165</sup> und künstlicher moralischer Maschinen<sup>166</sup> eingeführt, die zur Einordnung von Fahrerassistenzsystemen

---

und Wirkvorschriften“. Eine Sicherheits- oder Betriebssicherheitsprüfung, wie sie z.B. in der Arbeitssicherheit für privat und geschäftlich genutzte Pkw (der Klasse M1) gefordert wird, ist nicht vorgeschrieben. Inwiefern diese zukünftig analog zu Lkw mit einer zusätzlichen Sicherheitsprüfung, die eine „Wirkungs- und Funktionsprüfung“ (StVZO Anlage VIII (§ 29 Absatz 1.3.1) vorschreibt, belegt werden, ist zurzeit nicht absehbar. Im Falle der geschäftlichen Nutzung könnten diese beispielsweise aus den Anforderungen der Berufsgenossenschaften als Ausdruck gesellschaftlicher Konsensfindung für Sicherheit im Arbeitsleben resultieren.

<sup>165</sup> Roboter-Ethik kann auf drei Weisen unterschieden werden. 1. Robo-Ethik: die sich mit der Ethik der Roboter-Konstrukteure und -Benutzer beschäftigt, 2. Maschinen-Ethik: die sich mit der Frage der maschinellen Implementierbarkeit und Berechnung beschäftigt, 3. Ethisches Argumentieren der Roboter selbst (Abney 2012). Ethik wird im Folgenden als die Untersuchung (normativ) und Beschreibung (deskriptiv) von allgemeingültigen Aussagen über das gute und gerechte Handeln sowie Sitte, Sittlichkeit und Gerechtigkeit verstanden. Moral ist für die Menschen ein konstitutiver, normativer Grundrahmen für das Verhalten, der im Folgenden für die Bewertung einer Handlung verwendet wird. Vergleiche Höffe (1997, Einträge: „Ethik“ und „Moral“).

<sup>166</sup> Auch als Artificial Moral Agent (AMA) bezeichnet (Allen et al. 2000).

notwendig erscheinen. Anschließend wird die Unfallfolgenminderung durch automatische Eingriffe mit einer Trefferlagenänderung eingeordnet. Für die Trefferlagenänderung im Querverkehr werden die aus der Unvollständigkeit der Umfelderkennung resultierenden Probleme bei der moralischen Bewertung diskutiert. Es ist zu klären, ob ein System in der vorgeschlagenen Art und Weise, basierend auf unsicheren Informationen, handeln darf und welche Informationen dabei mindestens berücksichtigt werden müssen.

#### **3.6.1 Einführung**

Maschinen, die aus einer Aktorik und einem Computer inklusive eines Programms zur Steuerung bestehen, kann man als Roboter bezeichnen. In diesem Sinne kann ein Fahrzeug mit Fahrerassistenzsystem auch als Roboter bezeichnet werden.

Die Fragestellung, wann eine Maschine richtig und wann sie falsch handelt, lässt sich nur aus dem Kontext und der Art der Betrachtung bewerten. Grundlage für die Bewertung ist die verwendete moralische Sichtweise. Zahlreiche Arbeiten der Maschinen- und Robo-Ethik untersuchen, wie Computer ethische Grundsätze implementieren bzw. moralisch richtige Handlungen berechnen können.<sup>167</sup> Die Maschinen-Ethik beschäftigt sich mit dem Verhalten künstlicher moralischer Agenten. Dabei geht es in erster Linie nicht um die resultierenden (Hardware/Software) Architekturen zur praktischen Umsetzung, sondern vor allem darum, ob und wie menschliche Moral in maschineller Form beschreibbar und berechenbar ist. Die Robo-Ethik beschäftigt sich hingegen mit dem Verhalten bzw. der Ethik von Menschen, die Roboter entwerfen, konstruieren und benutzen (Veruggio 2006, Abschnitt 1.5.2). Im Bereich der Fahrerassistenz überschneiden sich Maschinen- und Robo-Ethik. Leicht sind Situationen konstruierbar, bei denen die aus der Robo-Ethik impliziert kodierte Verhaltensweisen in einen konkurrierenden Zustand geraten und mithilfe eines moralischen Agenten situativ gelöst werden müssen. Da für das vorliegende Handlungskonzept die Verkehrssituation bei einer unver-

---

<sup>167</sup> Beispielsweise „computational ethics“ (Allen 2002), „machine ethics“ (Anderson & Anderson 2006), „machine morality“ (Wallach et al. 2008), „moral machines“ (Wallach 2010).

meidbaren Querverkehrskollision sehr genau definiert ist, liegt im Folgenden der Fokus auf Aspekten der Robo-Ethik.<sup>168</sup>

Moralische Maschinen zu bauen kann als theoretische Fragestellung<sup>169</sup> untersucht werden oder als praktische Herausforderung gesehen werden, mit dem Ziel automatische bzw. autonome Maschinen zu bauen, die Menschen keinen Schaden zufügen und sich an zu definierenden ethischen Grundsätzen orientieren (Wallach 2010). Moralische Fragestellungen müssen damit auch im Bereich der Fahrerassistenz adressiert werden, wenn die zu erwartenden Verkehrssituationen nicht mehr durch eindeutig beschriebene Handlungsvorschriften a priori behandelt werden können. Für Systeme zur Unfallvermeidung und Unfallfolgenminderung bedeutet dies, im Falle konkurrierender Handlungsvorschriften eine allgemein akzeptierte Handlung auszuwählen. „Akzeptiert“ impliziert dabei eine moralische Bewertung anhand von zu definierenden Kriterien<sup>170</sup> und eines Kontextes<sup>171</sup> der Betrachtung.<sup>172</sup>

Bei der moralischen Bewertung von unfallfolgenmindernden Systemen konkurrieren zwei ethische Sichtweisen. Auf der einen Seite steht die deontologische Sicht, bei der die Handlungen unabhängig von ihren Folgen und Konsequenzen bewertet werden. Stattdessen gibt es verpflichtende Regeln, die das „Richtige“ definieren und nicht verletzt werden dürfen. Auf der an-

---

<sup>168</sup>Eine detaillierte Übersicht der unterschiedlichen Aspekte findet sich in verschiedenen Kapiteln in Lin et al. (2012).

<sup>169</sup>Beavers (2012) untersucht, ob es theoretisch überhaupt möglich ist eine Ethik komplett maschinell zu berechnen. Wenn eine Ethik berechenbar ist, weist sie damit inhärente moralische Grenzen auf. Daraus ergibt sich auch eine Form des „ethischen Nihilismus“, also einer Ethik ohne moralische Grenzen und damit ein Widerspruch entweder zu der Definition einer Ethik mit moralischen Grenzen oder der Berechenbarkeit dieser.

<sup>170</sup>Kriterien können anhand moralischer und ethischer Grundsätze definiert werden. Beispielsweise Three Laws of Robotics nach Asimov (1942), Tugenden-Ethik nach Aristoteles (Bambrough 2003), kategorischer Imperativ nach Kant (1791), Utilitarismus nach Bentham (1879), religiöse Regeln etc.

<sup>171</sup>Mit „Kontext“ ist der Betrachtungsrahmen gemeint (Rahmenproblem). Dabei stellt sich für die Fahrerassistenz bei unvermeidbaren Kollisionen die Frage, ob nur die Insassen eines Fahrzeugs, alle direkt am Unfall Beteiligten oder sogar die indirekt durch einen Unfall Beteiligten (z.B. Angehörige) betrachtet werden.

<sup>172</sup>Gleichzeitig stellt sich die Frage, wie das System erkennt, ob bei der Auswahl einer Handlung in dieser Situation eine moralische Bewertung notwendig wird. Auf diesen Aspekt wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da das Problem der Trefferlagenänderung immer auch ein Problem der moralischen Bewertung ist.

deren Seite steht die konsequentialistische Sicht, bei der eine Handlung nur anhand ihrer Folgen und Auswirkungen betrachtet wird.

Problematisch bei einer deontologischen Beurteilung ist die Vereinbarung allgemeingültiger Regeln, die in sich widerspruchsfrei sind. Eine verpflichtende Regel zur Unfallfolgenminderung könnte lauten, dass ein System so gebaut sein muss, dass es jedweden Personenschaden verhindern muss. Für die Systemauslegung würde dies allerdings bedeuten, dass bei einer Kollisionsgefahr sofort eine Handlung zur Unfallfolgenminderung ausgelöst werden muss und nicht bis zum Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit gewartet werden kann.<sup>173</sup> Zugleich könnte man folgern, dass ein solches System die Fahrzeuggeschwindigkeit in der Art reduziert, dass es in unübersichtlichen Verkehrsszenen<sup>174</sup> ausschließen kann in eine Situation zu kommen, bei der eine Kollision erst so spät erkannt wird, dass sie unvermeidbar ist. Kommt es tatsächlich dazu, dass eine Verkehrssituation erst so spät erkannt wird, dass eine Kollision unvermeidbar ist, könnte dann trotzdem kein Eingriff zur Trefferlagenänderung erfolgen, weil nicht mehr auszuschließen wäre, dass eine Person durch die Kollision (ob mit oder ohne Eingriff) Schaden erleidet. Eine etwas abgeschwächte Formulierung, die fordert, dass beispielsweise kein größerer Schaden mit Eingriff als ohne Systemeingriff entstehen<sup>175</sup> darf oder,

---

<sup>173</sup>Für häufig oder sogar ständig auslösende Systeme sind Konsequenzen hinsichtlich der Nutzerakzeptanz wahrscheinlich. Gleichzeitig kann es zu einer Benachteiligung der Fahrzeuge mit System kommen. Die Konsequenzen können exemplarisch am Beispiel der Einführung bzw. Auslegung von ACC-Systemen gezeigt werden. Die Abstandslücken zum vorausfahrenden Fahrzeug unterliegen, neben den Sicherheitsbestimmungen, dem Sicherheitsbedürfnis und -empfinden des Fahrers sowie den technischen Möglichkeiten des Systems. Dabei kann es bei sehr dichtem Verkehr zu einem ständigen Aufbau von Abstandslücken kommen. Nicht kooperativ fahrende Fahrzeuge fahren in diese Lücken, was zu einem erneuten Aufbau der Abstandslücke durch das ACC-System führt. Durch die ständige Geschwindigkeitsreduktion kommt es zu einer Benachteiligung, die auch durch die Fahrer wahrgenommen wird. Vergleiche beispielsweise Nowakowski et al. (2011, Abschnitt 9.4.3 und 9.4.4).

<sup>174</sup>Verschärft könnte es auch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf die Richt- bzw. vorgeschriebene Maximalgeschwindigkeit begrenzen. Diese Systeme sind unter dem Begriff „intelligent speed adaptation (ISA)“ bekannt und können zu einer Reduktion der Verletzten und Getöteten beitragen. Carsten & Tate (2005) geben beispielsweise für Großbritannien, bei einer Ausstattungsrate von 100 %, eine Reduktion um 36 % der Verletzungen und 59 % der Getöteten in 2019 an. Vergleiche auch die Ergebnisse der Felduntersuchungen in Schweden (Biding & Lind 2002) oder Belgien (Vlassenroot et al. 2007).

<sup>175</sup>In Anlehnung an die rechtliche Bewertung von Klindt & Handorn (2010).

dass keine Person durch den Eingriff zu Schaden kommen darf, umgeht diese Problematik<sup>176</sup>. Allerdings ist dafür ein bewusster Vergleich bzw. eine Abwägung zwischen den verschiedenen Handlungen und eine Bewertung der Auswirkungen notwendig.

Die Fahrerassistenzsysteme und relevante Normen sind daher aus konsequentialistischer, (häufig) utilitaristischer Sicht begründet. Ziel des Systems ist die Reduktion der Anzahl der Unfälle und ihrer Auswirkungen. Somit handelt das System moralisch richtig, wenn es über die Summe seiner Eingriffe, d.h. ohne ein Abstellen auf den Einzelfall, mehr Leben rettet, Verletzungen vermeidet und Sachschäden verhindert, als es durch falsche und fehlerhafte Auslösungen verursacht. Dabei kommt es wieder auf den Betrachtungsrahmen an. Ethisch problematisch ist jedoch die Bewertung des Einzelfalls und die nicht zwangsläufig gegebene Deckungsgleichheit der beiden Gruppen<sup>177</sup> von Geschädigten.<sup>178</sup> Wie groß der Unterschied sein muss, um die durch das System Geschädigten zu rechtfertigen, soll hier nicht erörtert werden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die Verteilung der Eigenschaften der Unfallbeteiligten in beiden Gruppen (mit und ohne System) gleich bleibt.<sup>179</sup> Geht man für die Gruppe der beim Unfall ohne System Geschädigten von einer rein zufälligen Zusammensetzung der Gruppe hinsichtlich Alter, Geschlecht, Gewicht etc. aus, so ist diese Annahme für eine Menge Geschädigter in einem Szenario mit System nicht notwendigerweise gleich. So kann durch das System ein Bias nach Alter, Geschlecht, Gewicht, Art des Verkehrsteil-

---

<sup>176</sup>Dabei reduziert sich allerdings auch die Effizienz des Systems.

<sup>177</sup>Zum einen die Gruppe der Getöteten und Verletzten mit System und zum anderen die Gruppe der Getöteten und Verletzten ohne System.

<sup>178</sup>Unterschieden wird zwischen der Gruppe der Verunfallten vor Einführung des Systems und der Gruppe, die sich nach Einführung des Systems ergibt. Reduziert beispielsweise ein System die Anzahl der tödlich Verunglückten von 4000 auf 3000 pro Jahr, wird dies nach Lin (2013) von der Gesellschaft positiv bewertet. Aufgrund der großen Anzahl zufälliger Einflüsse auf die Zusammensetzung einer Verkehrssituation ist davon auszugehen, dass von den 4000 nicht 1000 gerettet werden, die sonst geschädigt würden. Beispielsweise könnten 2000 von 4000 gerettet werden und dafür 1000 andere Personen verunglücken, die ohne System nicht geschädigt worden wären.

<sup>179</sup>D.h. keine Verschiebung in der Art der Verkehrsbeteiligung, beispielsweise vom Pkw-Fahrzeuginsassen zum Fußgänger oder von älteren Insassen zu Kindern etc.

nehmers und Fahrzeugs etc. entstehen, je nachdem welche Informationen das System verwendet, um das Unfallgeschehen zu optimieren.<sup>180</sup>

Lin (2014) untersucht den Fall, dass ein System zur Unfallfolgenminderung (bei Auslösung) die Wahl hat entweder in einen Kleinwagen oder in einen SUV zu fahren.<sup>181</sup> Je nach Information kann das System den Unfall für das eigene Fahrzeug, die Menge der fremden Fahrzeuge oder aller potenziell Geschädigten optimieren. Wird dann immer der SUV gestoßen, weil die Insassen dort möglicherweise ein geringeres Verletzungsrisiko haben? Oder wird bei voller Sitzbelegung des eigenen Fahrzeugs der Kleinwagen gestoßen, weil ausgehend von einer geringen Belegungsrate über alle Fahrzeuge dort weniger Insassen verletzt werden und die eigenen Insassen besser geschützt sind? Ist es am günstigsten ungebremst (kein Bremsnicken) in den Kleinwagen zu fahren, um das „Überfahren“ der Seitenaufprallstrukturen zu forcieren? Damit würde der eigene Crash-Impuls weicher aber gleichzeitig die Intrusion beim Unfallgegner erhöht. Ähnliche Dilemma lassen sich konstruieren, indem bspw. eine Kollision mit einem Schulbus nur durch Ausweichen, mit tödlichen Konsequenzen für die Insassen des ausweichenden Fahrzeugs, vermieden werden kann (Lin 2013).

Lin (2013) schreibt, dass ein System das Fahrzeug dabei vermutlich immer ausweichen lässt, aber sollte das eigene Fahrzeug nicht den Unfall für die

---

<sup>180</sup>Im Fall der Trefferlagenänderung im Querverkehr ist zu vermuten, dass die Insassen der hinteren Sitzreihen überproportional häufig von Kindern besetzt sind. Zu untersuchen ist, ob aufgrund des Alters und der Größe bzw. der Kindersitze für diese Gruppe ein geringeres Verletzungsrisiko besteht. In diesem Fall steht zu erwarten, dass auch durch die Verschiebung nach hinten kein Bias in Richtung der Kinder entsteht.

<sup>181</sup>Lin (2014) erwähnt die zur Beurteilung relevanten Fahrzeugparameter nicht. Diese sind: (1) generische Kompatibilität, (2) strukturelle Kompatibilität, (3) Massenkompatibilität. O'Brien (2010, Abschnitt 5.2) zeigt, dass im Querverkehr bei einem ungleichen Massenverhältnis die Verletzungsrisiken für alle am Unfall Beteiligten steigen. Deswegen ist auch die Schlussfolgerung von Lin (2014) fraglich, der annimmt, dass ein System bevorzugt in den SUV fahren würde.

eigenen Insassen optimieren? <sup>182</sup> Wie behandelt es dann eine Situation mit drei möglichen Ausgängen:

1. Eine Kollision ohne Eingriff tötet Fahrer und Beifahrer
2. Mit Eingriff A wird nur der Beifahrer getötet
3. Mit Eingriff B wird nur der Fahrer getötet

Muss sich das System für Eingriff A oder B entscheiden, um die Anzahl der Getöteten zu minimieren? <sup>183</sup> Sollte der Fahrer vor Fahrtantritt wählen können welcher Fall zu bevorzugen ist, um beispielsweise seine Tochter auf dem Beifahrersitz immer zu retten? Sollte dies dem Beifahrer kommuniziert werden? Sollte er auch den umgekehrten Fall wählen können, wenn dort eine ungeliebte Person sitzt? Wie wird ein solches System parametrisiert, wenn es in ein Taxi eingebaut wird? Schützt es den Fahrer oder den zahlenden Gast? Muss er sich vorher mit der Programmierung des Systems beschäftigen, um festzustellen wie sich sein Fahrzeug verhalten wird? Muss dann bereits in einem heutigen Fahrzeug eine Bewertung der Sicherheit der einzelnen Sitzplätze vorgenommen werden? Auch im Hinblick auf die kommerzielle Personenbeförderung müsste allen Insassen vor Fahrtbeginn plausibel erklärt werden, welche Einstellung aktiv ist und welche Risiken daraus entstehen.

---

<sup>182</sup> Dem ist entgegenzuhalten, dass diese Entscheidung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit getroffen werden muss. Durch die hohe Masse des Busses, der geometrischen Inkompatibilität und der Leiterwagenrahmenstruktur sowie der biomechanisch hohen Belastbarkeit der Schulkinder im Vergleich zu Erwachsenen, ist das Risiko bei geringen Geschwindigkeiten in den Bus zu fahren vermutlich vertretbar. Offen bleibt dabei auch die Frage, warum man gesellschaftlich Kollisionen mit Schulbussen einerseits als moralisch falsch ansieht, aber andererseits nicht fordert, dass sich deren Insassen verpflichtend anschnallen?

<sup>183</sup> Kann sich das System basierend auf einer deontologischen Regel „Du sollst nicht töten“ nicht für einen Eingriff A oder B entscheiden, weil beide Eingriffe die Regel verletzen, hat es die Möglichkeit gar nicht zu handeln. Paradoxerweise führt das Auslassen eines Eingriffs dazu, dass zwei Leute getötet werden, was auch der Regel widerspricht. Eine Möglichkeit zum Umgang mit diesem Paradoxon ist es, zwischen aktivem und passivem Handeln zu unterscheiden. Dabei wird nach deontologischer Sicht die Intrinsik der Handlung bewertet. Eine gezielte Tötung ist damit moralisch fragwürdiger als das passive Zulassen, bei dem beide Insassen sterben, was wiederum im Gegensatz zur volkswirtschaftlichen Betrachtung steht.

Der Umgang mit diesen als „no-win situations“ bezeichneten Situationen ist von Lin aus zwei Richtungen betrachtet worden. (Lin 2013)<sup>184</sup> ver-

---

<sup>184</sup> „If we view the right not to be killed as the right not to be an accident victim, well no one has that right to begin with“ (Lin 2013). Diese Ansicht teilt auch Homann (2005, Abschnitt 2) der darauf verweist, dass das Straßenverkehrsrecht auf dem Grundsatz beruht, dass „Schädigungen anderer, da statistisch unvermeidlich, 'erlaubt' sind, aber entschädigt werden müssen“.

Die sehr optimistischen Darstellungen von Lin und Homann finden sich in der deutschen Gesetzgebung nicht direkt wieder. Der Gesetzgeber erkennt zwar eine abstrakte Gefährdung, die sich aus der Teilnahme am Straßenverkehr ergibt, verbietet jedoch explizit „andere zu schädigen [und] zu gefährden“ und erkennt ein „Universalinteresse an Sicherheit im Straßenverkehr“ an (Hentschel et al. 2011, §1 StVO, Rz 8). Gleichzeitig ergibt sich im Rahmen des „Vertrauensgrundsatzes“ kein Gebot „jedes denkbare verkehrswidrige Verhalten“ zu antizipieren und sich entsprechend darauf einzustellen, um nicht „den Verkehr lahmzulegen“ (Hentschel et al. 2011, §1 StVO, Rz 20). Im Gegensatz zu diesem Vertrauen auf verkehrsgerechtes Verhalten anderer stehen die Gebote zum defensiven Fahren und entsprechende Sorgfaltspflichten (Hentschel et al. 2011, §1 StVO, Rz 25). Das BGH stellt in seinem Urteil vom 18.11.2003 (VI ZR 385/02) fest, dass es das Ziel des Straßenverkehrsrechts ist „Sicherheit und Leichtigkeit [zu] gewährleisten“ und dabei typische Gefahren, die vom Straßenverkehr ausgehen und die dem Straßenverkehr von außen und durch Verkehrsteilnehmer erwachsen, abzuwehren. Eine implizite Einwilligung Schädigung zu akzeptieren ergibt sich damit nicht. Verstöße werden allerdings nicht strafrechtlich verfolgt, es sei denn sie verstoßen gegen § 315 ff. StGB bzw. wenn es sich um ein Tötungs- oder Verletzungsdelikt handelt (§§ 222, 229 StGB). Der bemerkenswerte Unterschied ist, dass Verstöße in Abhängigkeit des eingetretenen Schadens verfolgt werden und damit größtenteils als einfache Bußgeldverfahren von Amts wegen per Bußgeld-Katalog entschieden werden. Dabei wird gleichzeitig das Gros der Schäden auf die „Risiko- und Haftungsgemeinschaft“ quasi vergesellschaftlicht (Nehm 2012). Darin besteht aber eben der Unterschied zu der Darstellung von Lin und Homann. Anders als beispielsweise im Sport, wo auch bei regelwidrigem Foul mit Körperverletzung keine Untersuchung auf fahrlässige Körperverletzung durch die Staatsanwaltschaft durchgeführt wird, erfolgt diese im Straßenverkehr automatisch. Ziel ist eine genaue Analyse von Ursache, Wirkung und Schuld. Obwohl die Rechtsordnung gewisse Risiken des sozialen Zusammenlebens in Kauf nimmt erfolgt eine Beurteilung anhand des Grades der Vermeidbarkeit: „Strafe droht dem, der das erlaubte Risiko überschreitet und voraussehbar andere schädigt“ (Nehm 2012).

Damit ließen sich Lin und Homann zum Widerspruch führen. Dennoch sieht die gelebte Praxis anders aus. Die strafrechtliche Relevanz der fragilen Rechtsgüter, körperliche Unversehrtheit und Gesundheit, wird durch diese Untersuchungen betont und gewährleistet. Allerdings erfolgt eine erhebliche Entkriminalisierung, da es fast schon zu einer amtsgleichen Untersuchung anhand bestimmter Kriterien kommt. Diese sind allerdings nicht einheitlich festgehalten und unterscheiden sich in der alltäglichen Praxis je nach Bundesland (Nehm 2012). Im europäischen Kontext sind die zugehörigen Gesetze diesbezüglich in jüngster Zeit daher mit entsprechenden Bagatelklauseln weiterentwickelt worden. Beispielsweise in § 88 des österreichischen Strafgesetzbuchs, der regelt, dass fahrlässige Körperverletzung im Stra-



steht die Teilnahme am Straßenverkehr als Einwilligung zu einer der beiden Unfallopfer-Gruppen zu gehören. Die Präsenz eines Systems und der ausgelöste Systemeingriff gehören damit zur Menge der Zufallsvariablen, die jede Verkehrssituation beschreiben und damit in zufälliger Art und Weise das Risiko definieren. In seiner dialektischen Zusammenfassung sieht er im Fortschritt der Technologie eine für den Menschen unvorhersehbare Reihe an ethischen Auswirkungen, die bestmöglich und wissentlich vorangetrieben werden müssen, um nicht aus Angst vor möglichen negativen Konsequenzen die statistischen Vorteile nicht zu realisieren.

Lin (2014) diskutiert, ob die zufällige Auswahl eines Eingriffs als Nachahmung der menschlichen Eigenschaft, in Sekundenbruchteilen keine genaue Abwägung treffen zu können, eine Lösung der grundlegenden moralischen Fragen darstellt. Fahrerassistenzsysteme sollen ja aber genau diese Defizite des menschlichen Fahrers adressieren. Sie über eine Zufallskomponente künstlich zu verschlechtern, gleicht laut Lin (2014) eher einem Ausweichen der moralischen Fragestellung als einer Antwort. Er schlägt vor für zukünftige Systeme genau zu untersuchen, welche Informationen vorliegen müssen und welche gezielt nicht zu erfassen sind bzw. in einem Entscheidungsverfahren nicht zu berücksichtigen sind, um keine diskriminierende Handlung auszuführen.<sup>185</sup> Es erscheint zumindest zweifelhaft, dass durch die Auswahl der wegzulassenden Informationen kein Bias in die Entscheidungsfindung einfließt. Zugleich stellt sich die Frage der resultierenden Effektivität im Unfallgeschehen.

Lin (2014) fasst zusammen, dass es heute für Fahrerassistenzsysteme noch keine eindeutige, allgemeingültige und akzeptierte Lösung gibt. Für ihn sind

---

ßenverkehr „nicht bestraft wird wenn der Täter kein schweres Verschulden trifft“ und wenn der Geschädigte „keine Gesundheitsschädigung oder Berufsunfähigkeit von mehr als 14 Tagen“ erleidet.

<sup>185</sup>Durch das daraus resultierende Szenario müssten Unfallsituationen entweder stark vereinfacht oder mit einer Worst-Case Annahme bezüglich Alter, Geschlecht, Gewicht etc. berechnet werden, wodurch implizit wieder ein Bias gegen die Best-Case Gruppe entstünde. Wenn die Auslegungsgrundlage aber ein Worst-Case mit einer 95-jährigen Fahrerin ist oder wie Lin vorschlägt, durch Weglassen von Informationen zu völlig von Verletzungsschwere-Betrachtungen losgelösten Berechnungen führt, ist der Bias vermutlich stärker als der Nutzen, den ein System generieren kann.

Bewertungsfunktionen<sup>186</sup>, die die Konsequenzen der Handlungen beschreiben, eine Lösung diese gegeneinander abzuwägen und transparent darzustellen<sup>187</sup>, um die richtige Erwartungshaltung bei den Nutzern und in der Öffentlichkeit zu vermitteln. Die Erwartungen an ein System sind dann Gegenstand der öffentlichen Diskussion und Konsensfindung. Eine allgemeingültige Antwort zur Bewertung der aufgezeigten moralischen Fragestellungen kann daher im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden. Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie man im speziellen Fall der Trefferlagenänderung im Querverkehr bei einer unvermeidbaren Kollision argumentieren kann, welche Informationen aus Sicht der Unfallforschung relevant sind und auf welchen Ebenen eine moralische Betrachtung stattfinden kann.

### **3.6.2 Betrachtung der Trefferlagenänderung im Querverkehr**

Ausgehend von einer Verkehrssituation bei der es zu einer Kollision zwischen einem stoßenden Fahrzeug und einem querenden Fahrzeug kommt, lassen sich unterschiedliche Grade der vorhandenen Information definieren. Ideal ist der theoretische Zustand perfekten Wissens, bei dem jedwede Informationen, ihre Zusammenhänge und alle daraus entstehenden Konsequenzen bzw. Ergebnisse vorliegen. Dieser Zustand kann maschinell weder erfasst noch verarbeitet werden, da er unendlich viele Informationen enthält, auch die der aktuellen Erfassung und Verarbeitung.

Die in dieser Arbeit verwendete Definition einer Verkehrssituation nach Maurer (2000) beinhaltet die „Gesamtheit der Umstände die vom Roboter bei der Auswahl eines in dem jeweiligen Moment geeigneten Verhaltensmusters zu berücksichtigen sind“<sup>188</sup>. Maurer geht in seiner Arbeit nicht auf Ethik

---

<sup>186</sup>Neben monetären Maßstäben sind insbesondere Bewertungsfunktionen, die auf einer (wie auch immer gearteten) Verletzungsschwere basieren, denkbar. Heute sind das beispielsweise Letalitätsbetrachtungen und Behandlungskosten als Proxyvariable der Langzeitfolgen. Wichtig für die Bewertungsfunktionen ist, dass diese konsistent hinsichtlich der stattfindenden Verschiebungen sind und kein internes Aufrechnen stattfindet.

<sup>187</sup>„Show your moral math“ (Lin 2014).

<sup>188</sup>Wershofen & Graefe (1996): Situationserkennung als Grundlage der Verhaltenssteuerung eines mobilen Roboters. In: Fachgespräch AMS. München. Zitiert nach Maurer (2000, Abschnitt 6.2).

oder Moral einer Handlung ein, obgleich man argumentieren könnte, dass diese schon implizit in „der Gesamtheit der Umstände“ enthalten sind. Maurer (2000, Abschnitt 6.2) schreibt, dass diese Gesamtheit alle „Umstände die für die Ausführung der aktuellen Aufgabe in dem jeweiligen Moment relevant sind“ enthält. Damit grenzt er den Betrachtungsrahmen auf eine konkrete Aufgabe und einen zeitlichen Moment ein, die entsprechend zu definieren sind. Konflikte bei der Verhaltensentscheidung werden bei Maurer (2000, Abschnitt 6.2.1) durch eine „zentrale Entscheidungsinstanz“ gelöst. Im autonomen Fall wird durch entsprechende Priorisierung spezialisierter Entscheider eine Alternativlösung oder im teilautomatischen Fall eine Lösung durch Einbeziehung des Menschen gefunden.

Die von Maurer gewählte Architektur erlaubt es damit eine ethische top-down Entscheidung im zentralen Entscheider auf höchster Ebene zu integrieren.<sup>189</sup> Auch der bei Maurer eher technisch betrachtete Begriff der Verkehrssituation lässt sich entsprechend durch eine moralische Bewertung der Handlungsmöglichkeiten bzw. ihrer Auswirkungen als eine Teilmenge der „Umstände“ erweitern. Für beide Erweiterungen ist eine Berechenbarkeit der moralischen Fragestellung notwendig. Für den Fall einer nicht entscheidbaren Situation ist eine Konfliktlösung über den Fahrer zwar möglich, aber aufgrund der geringen Zeiträume unrealistisch bzw. mit einer Deaktivierung des Systems gleichzusetzen. Damit ein System seine geplante Wirkung entfalten kann, muss die gewählte maschinelle Repräsentation der Verkehrssituation daher entsprechend umfassend sein. Damit ergibt sich im Sinne von Allen & Wallach (2012, Abschnitt 4.1) keine „full moral agency“, aber die Möglichkeit operationale bis hin zu funktionaler Moral zu implementieren.<sup>190</sup>

Eine maschinelle Repräsentation der Verkehrssituation ist in der Praxis durch die maschinelle Wahrnehmung und Situationsinterpretation unvollständig und vereinfacht. Damit wird sie in einigen Situationen auch fehlerhaft

---

<sup>189</sup>Inwiefern diese realisierbar ist diskutieren beispielsweise Wallach et al. (2008); Beavers (2012).

<sup>190</sup>Nach Allen & Wallach (2012) ist operationale Moral („operational morality“) von künstlichen moralischen Agenten ein Zustand, bei dem moralische Fragen nur basierend auf den Konstruktionsvorgaben entschieden werden. Funktionale Moral („functional morality“), wenn die Maschinen moralische Fragestellungen einschätzen und beantworten können, und „full moral agency“ sind die Zustände, bei denen diese vollkommen autonom entscheiden und sich selbst weiterentwickeln.

sein. Im speziellen Fall des Querverkehrs sind dabei die Informationen über die beteiligten Fahrzeuge und Insassen sowie die Umweltbedingungen zur Trefferlagenänderung besonders relevant. Ausgehend von einer Fahrzeug- und Insassenerkennung, die zusätzliche Parameter<sup>191</sup> zur Berechnung der Verletzungsschwere mitliefert, über eine Insassenerkennung, die nur die Anzahl der Personen und ihre Sitzposition liefert, zu einer Objekterkennung, die ein querendes Objekt inklusive Fahrgastzellenschätzung liefert, bis hin zu einer einfachen L-Shape<sup>192</sup> Erkennung eines querenden Objektes, verliert man Informationen, um die Auswirkungen der Handlung zu berechnen bzw. zu bewerten. Eine Repräsentation der zugrundeliegenden Ethik kann über situativ angepasste Bewertungsfunktionen dargestellt werden (Lin 2014), beispielsweise die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten Risikofunktionen.

Abbildung 3.34 zeigt einen abstrahierten Regelkreis der Fahrerassistenzsystem-Handlung. Beginnend mit einer allumfassenden Umwelt, die indirekt eine Reihe an Voraussetzungen<sup>193</sup> schafft, bis hin zu sämtlichen Gegebenheiten, die aus der Handlung jedweder Person resultieren könnten (Butterfly Effect)<sup>194</sup> wird eine zufällige Verkehrsszene geschaffen. Aus dieser sehr globa-

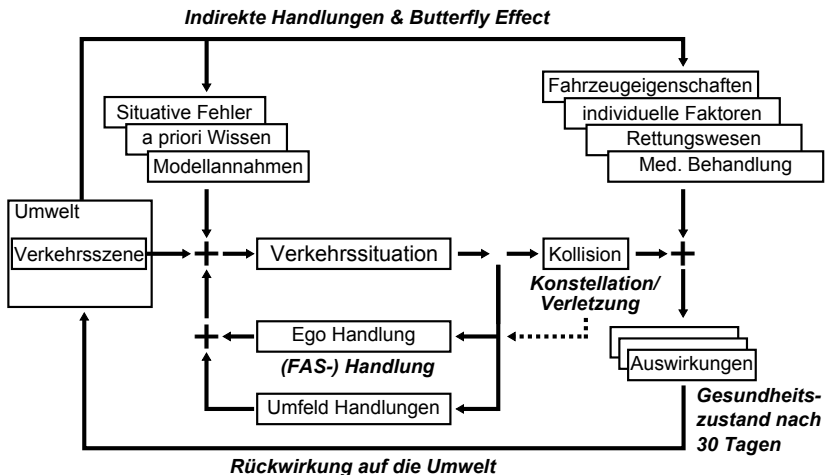
---

<sup>191</sup> Beispielsweise: Alter (McGwin, Jr. & Brown 1999; Evans 2001), Gewicht (Liu et al. 2013; Donnelly et al. 2014), sportlicher Trainingszustand (Prasad et al. 2010), Geschlecht (Santamarina-Rubio et al. 2014), Sitzposition (Staff et al. 2014), verwendete Rückhaltesysteme (Staff et al. 2014), Fahrzeuggewicht (Evans & Frick 1993; Toloucia et al. 2013), Kompatibilität der Fahrzeuge (Ulfarsson & Mannering 2004; Austin 2005; Mandell et al. 2010), Fahrzeugabmessungen (Wood 1997; Toloucia et al. 2013), Steifigkeit (Sahraei et al. 2014), Fahrzeugrahmenstruktur (Ossiander et al. 2014), Dauer der Teilnahme am Verkehrssystem (Santamarina-Rubio et al. 2013) etc.

<sup>192</sup> Länge und Breite des querenden Objekts.

<sup>193</sup> Beispielsweise: Verwendete Fahrzeuge, Fahrzeugtechnologien, Rauschen der sensorischen Messungen durch Umwelteinflüsse, biomechanisches Wissen über Seitenkollisionen, Modellannahmen bei der Implementierung der Fahrerassistenzsysteme etc.

<sup>194</sup> Der Butterfly Effect beschreibt die chaotische Natur dynamischer Systeme, insbesondere die Abhängigkeiten von kleinsten Änderungen der Ausgangsgrößen (Hilborn 2004). Der Flügel-schlag eines Schmetterlings steht stellvertretend für diese Änderung, die zu gänzlich anderen Ergebnissen führen kann. Lorenz (1963) beschreibt, dass sehr kleine Änderungen der Windbewegung über nicht-lineare Gleichungen sehr große Wettereffekte produzieren können, die räumlich und zeitlich weit entfernt liegen. Lorenz (1972) wird häufig als Erfinder mit diesem Phänomen in Verbindung gebracht, obwohl Bradbury (1952) bzw. schon Duhem & Stefanini (1898) ähnliche Methaphern verwenden. Übertragen auf die Philosophie der Chaos-Theorie bedeutet dies, dass sehr kleine Auslöser große und vor allem unvorhersehbare Effekte pro-



**Abbildung 3.34:** Regelkreis der ethischen Betrachtung. Kursiv und fett dargestellt sind die bewertbaren Handlungen und Konsequenzen eines Fahrerassistenzsystems. Gepunktet hervorgehoben ist die von vielen Fahrerassistenzsystemen optimierte Größe (Unfallkonstellation). Deutlich wird der Zusammenhang zwischen den für die ethische Betrachtung herangezogenen Punkte.

len Betrachtung leitet sich die erste Möglichkeit zur ethischen Bewertung ab: Welche Handlungen sind moralisch richtig bzw. notwendig, um ein System zur Trefferlagenänderung im Querverkehr zu entwerfen und zu konstruieren?

Die maschinelle Wahrnehmung und Situationsinterpretation bildet eine Darstellung der Verkehrssituation als Eingabe für ein Entscheidungsverfahren zur Auswahl einer Handlung bzw. Verhaltensbestimmung ab. Die ausgeführte Handlung oder die Unterlassung einer Handlung führt in Verbindung mit den Handlungen des Umfelds zu einer Folgesituation, bis es (möglicherweise) zur Kollision kommt. Dabei spielt die gewählte Architektur zur Verhaltensgenerierung keine Rolle. Die zweite ethische Bewertungsmöglichkeit betrifft

duzieren können (Urry 2005). Daher ist eine Reihe von Eingangsgrößen einer gesamtheitlich betrachteten Verkehrsszene unvorhersehbar, ebenso wie die Entwicklung nach einer Kollision.

einzig die ausgewählte Handlung bzw. das Verhalten: Ist die ausgewählte Handlung moralisch richtig?

Kommt es durch die Handlung zu keiner Kollision und keinem Schaden wird vereinfachend angenommen, dass die Handlung moralisch gut war. Tritt eine Kollision ein, kann die Auswirkung der Handlung entweder direkt als die Kollisionskonstellation bewertet werden oder indirekt über die resultierenden Verletzungen, die eine Kombination aus Umwelteinflüssen<sup>195</sup> und Kollisionskonstellation sind. Die Auswirkungen können sogar noch weitergehend bewertet werden, beispielsweise durch die Betrachtung des Gesundheitszustands aller Beteiligten nach 30 Tagen, nach zwei Jahren oder im Extremfall über die Rückkopplungen auf die Umwelt<sup>196</sup>. Die dritte Bewertungsmöglichkeit fragt daher, ob die direkten oder indirekten Auswirkungen der Handlung des Systems moralisch richtig sind. Zusammenfassend müssen drei Fragen beantwortet werden:

- Welche Handlungen sind ethisch/moralisch richtig bei der Konstruktion des Systems?
- Welche Handlungen sind ethisch/moralisch richtig zur Beeinflussung einer Gefahrensituation?
- Welche Auswirkungen von Handlungen sind ethisch/moralisch richtig in einer Gefahrensituation?

Die zur Beantwortung dieser Fragen notwendigen Informationen müssen transparent und verständlich dargelegt werden. Denn nur eine breite Öffentlichkeit kann die Antwort dazu geben und in Form von Normen, Gesetzen und Standards einen Rahmen schaffen, der es erlaubt eine fortschreitende automatisierte Zukunft zu erschaffen. Dann kann der Mensch bei seiner Teilnahme am Verkehr entsprechend seiner moralischen und ethischen Überzeugung Verantwortung für sein Handeln übernehmen. Und nur dann lässt sich die resultierende Frage, ob ein solches System aufgrund von ethischen Betrachtungen in den Verkehr gebracht werden darf, beantworten.

---

<sup>195</sup> Anzahl, Gewicht, Alter, Geschlecht der Personen etc.

<sup>196</sup> Beispielsweise über die Trauer der Angehörigen, verlorene Lebensjahre „lost years“ oder volkswirtschaftlich über den noch erwarteten Beitrag zum Bruttosozialprodukt etc.

In der Vergangenheit ist eine genaue Betrachtung bzw. Formulierung der zu erreichenden Ziele zumeist erst sukzessive über die Entwicklungsgenerationen bzw. in umfassender Form retrospektiv, also nach der Markteinführung, erfolgt. Betrachtet man die ersten Veröffentlichungen zu den jeweiligen Assistenzsystemen, steht immer ein bestimmter Anwendungsfall im Vordergrund, ohne eine umfängliche Bewertung wie in Abbildung 3.34 dargestellt, vorzunehmen. Vor diesem Hintergrund ist es problematisch, dass keine einheitlichen und exakten Definitionen für den Funktionsumfang der Systeme und wofür sie genutzt werden existieren. Wie sehr die unterschiedlichen Herstellerinterpretationen differieren, kann exemplarisch anhand der Einführung von ABS verdeutlicht werden. Zwischen den drei möglichen technischen Auslegungsfaktoren: (1) Anhaltewegverkürzung, (2) Erhaltung der Richtungsstabilität und (3) Erhaltung der Lenkbarkeit des Fahrzeugs beim Bremsen, lassen sich unterschiedliche Schwerpunkte legen, die insbesondere für den Fahrer unter dem Sammelbegriff ABS nicht transparent werden (Gosselin 1986) und (Johnson 2009, Kapitel 6). Bei der ersten Markteinführung Ende der 1960er und in den 1970er Jahren erfüllten die Systeme je nach Hersteller nur einige Kriterien.<sup>197</sup> Das Sure-Track System von Ford verhinderte nur das Blockieren der Hinterachse, um eine Richtungsstabilität zu garantieren (Madison & Riordan 1969). Chrysler garantierte mit dem Sure-Brake System eine Richtungsstabilität und Lenkbarkeit (Douglas & Schafer 1971), verlängerte dabei aber die Bremswege (Johnson 2009, Kapitel 6). Das Teldix-ABS (das später im Bosch-System aufging) garantierte die Lenkbarkeit bei gleichzeitiger Reduktion des Bremswegs (Leiber & Limpert 1968; Mitschke & Wiegner 1970). Es war aber teuer und extrem aufwändig zu applizieren, um eine Richtungsstabilität zu gewährleisten, und wurde erst durch Innovationen im Bereich der Mikroelektronik massenmarktfähig (Gosselin 1986). Untersuchungen zu den realisierbaren Auswirkungen bezüglich der Verkehrssicherheit (Feldefektivität) im realen Verkehr fanden erst in den 1990er Jahren statt, als diese Systeme eine entsprechende Marktverbreitung erreicht hatten. Cummings & Grossman (2007) untersuchen die Auswirkungen von ABS auf das Verletzungsrisiko des Fahrers und stellt fest, dass es keine statistisch bestimmbar

---

<sup>197</sup>Vergleiche Gosselin (1986). Aus heutiger Sicht muss ergänzt werden, dass Systeme mit „4 controls“ durch eine Giermomentabschwächung bei  $\mu$ -split Situationen gegenüber der Darstellung in Gosselin (1986) eine verbesserte Richtungsstabilität haben.

Auswirkungen hat, was mit früheren Vergleichsstudien konsistent ist. Im EU-Projekt TRACE wurden Vor- und Nachteile in einer Metastudie für alle am Markt befindlichen Fahrerassistenzarten verglichen (Bayly et al. 2007). Dabei wird deutlich, dass der Nutzen stets als absolute Reduktion bezogen auf alle Unfälle angegeben wird.<sup>198</sup>

#### **Weitere Überlegungen zur Rechtfertigung der Eingriffshandlung**

Der konsequentialistische Ansatz zur Begründung und Legitimation der aufgestellten Fragen erscheint unvollständig, da er sich im Einzelfall einer Dilemmaentscheidung schnell an einen Punkt bringen lässt, der gesellschaftlich immer wieder für kontroverse Debatten sorgen kann. Eine Handlung sollte daher in sich legitimiert sein. Sonst wird die (konsequentialistische) Bewertung der Auswirkungen einer Handlung möglicherweise zur Verwechslung mit der moralischen Bewertung der Handlung selbst führen (Fischer et al. 2008, Abschnitt 1.8). Eine Ethik, die dem Einzelfall keine Bedeutung mehr schenkt, führt zudem zu einem steten Diskurs über den zugrundeliegenden Bewertungsmaßstab bzw. die verwendete (Bewertungs-) Methodik. Dies

---

<sup>198</sup>Neben der Untersuchung der erwarteten Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit ist bemerkenswert, dass seit den Untersuchungen zur Einführung der 3. Bremsleuchte (Kahane 1989) überwiegend nur sehr kleine Studien und Stichproben untersucht wurden, um die tatsächlichen Auswirkungen vor einer großflächigen Markteinführung zu bewerten. Dabei werden zur Legitimation der Systeme immer kleinere Anwendungsfälle wie beispielsweise der Fußgängerschutz im Falle des BAS verwendet, um a priori einen Nutzen anhand bestimmter Annahmen für sehr große Wirkfelder auszuweisen (Kiesewetter et al. 1997; Unselt & Eckstein 2004). Für das ABS wurden vor der Markteinführung keine Untersuchungen durchgeführt (Johnson 2000, Kapitel 1). Bei der a-posteriori Betrachtung nach Markteinführung wird dann gezielt die Effizienz im adressierten Wirkfeld untersucht und auf das Gesamtunfallgeschehen hochgerechnet. Eine genaue Betrachtung aller beeinflussten Unfälle, beispielsweise ob sich die Anzahl der Auffahrunfälle erhöht, wird entweder nicht durchgeführt oder lässt sich nicht mehr genau auf einzelne Einflussfaktoren und Wechselwirkungen zurückführen. Vergleiche Page et al. (2007) für einen Vorschlag zu einer geeigneten Methodik. Für den BAS vergleichen Page et al. (2005) die prognostizierte Effizienz mit der im Feld realisierten. Obwohl sie im Feld nur einen Nutzen für den Peugeot 406 und den Renault Laguna finden, prognostizieren sie eine hohe Effizienz für das gesamte Wirkfeld: „In any case [...] efficiencies are very high“. Insbesondere der Aspekt der Adaption durch die Fahrer, die ihre Fahrweise anpassen und damit die Systemeffekte kompensieren, möglicherweise sogar überkompensieren, kann häufig, aufgrund der ungenauen Unfalldaten bzw. der mangelnden Kenntnisse über den Fahrer und sein Fahrverhalten, nicht betrachtet werden (Elslande et al. 2008, Kapitel 6 + 7).



führt unweigerlich zu einer Unsicherheit, die im Widerspruch zur notwendigen langfristigen Legitimation bei Einführung eines neuen Fahrerassistenzsystems steht.

Der folgende Abschnitt stellt den Versuch dar einen Ansatz zu geben, die Handlungsweise unabhängig von ihren Folgen zu legitimieren. Damit soll eine Beurteilung, die unabhängig von konkreten Einzelfällen ist, ermöglicht werden. Die Legitimation rein über deontologische Ansätze erscheint jedoch schwierig. Einen Imperativ im Sinne Kants zu formulieren gelingt, aufgrund der notwendigen Abwägung bei der Handlungsauswahl, nicht.

Hegels Kritik an Kant ist, dass sich in der Formulierbarkeit eines Imperativs noch kein Maßstab befindet und sich damit irgendeine Bestimmtheit zum sittlichen Gesetz erheben lässt. Die angesprochenen Handlungsabwägungen müssen also Teil der Formulierung des Imperativs sein. Ausgehend von der beispielhaften Formulierung, dass durch einen Eingriff im Querverkehr kein Beteiligter geschädigt werden darf, erkennt man leicht die Tautologie, denn im Einzelfall kann entweder für die Insassen des gestoßenen Fahrzeugs oder für die Insassen des stoßenden Fahrzeugs richtig gehandelt werden.

Singer (1975, Abschnitt VIII, §5) kritisiert Kants Imperative als ethischen Rigorismus und sieht sie als willkürlich an. Er fragt, warum die Verallgemeinerung eine Handlung im Einzelfall legitimiert, bzw. sie legitimieren muss. Dabei spielen Aspekte des Betrachtungsstandpunkts eine wichtige Rolle, auf die auch Habermas (1991, Abschnitt ad1) hinweist. Die Gesamtheit der Gesellschaft gilt dabei als unparteiliche Instanz, was der konsequentialistischen Legitimation einer Handlung sehr nahe kommt und damit zunächst nicht viel weiter führt, als die schon beschriebenen konsequentialistischen Ansätze.

Um eine Handlung als moralisch richtig zu definieren, kann man die Frage stellen: „Ich sehe wohl, dass ein Eingriff die Unfallschwere mindert – aber ist er auch gut?“ (Fischer et al. 2008, Abschnitt 1.7). Damit fragt man gezielt nach der Unterscheidung zwischen der ethisch gebotenen Handlung und dem ethisch richtigen Resultat. Folglich wird die Handlung (der Eingriff) deontologisch und nicht konsequentialistisch bewertet. Eine Handlung ist damit nicht moralisch richtig oder falsch wegen ihrer Folgen, sondern in sich selbst. Diese Bewertung ist daher auch immer abhängig von der Perzeption, also wer etwas wahrnimmt und wie er das Wahrgenommene bewertet. Notwendig ist es dafür zu unterscheiden, was überhaupt möglich bzw. erreichbar ist. Fischer

et al. (2008, Abschnitt 5.5) unterscheiden zwischen „können“ und „sollen“ und fordern: „Ultra posse nemo obligatur – Über sein Können ist niemand verpflichtet“.

An dieser Stelle sollen die Handlungen – zunächst ohne eine Priorität einzuführen – zur angesprochenen Pflicht Die Unfallschwere für alle Beteiligten am Unfall zu reduzieren (oder wenigstens nicht zu verschlechtern) genauer definiert werden als bisher („für alle am Unfall Beteiligten“). Geht man vereinfachend nur von Fahrzeuginsassen aus, ergeben sich folgende detailliertere Eingriffe als Variationen der prinzipiellen Handlungen:

A. Handle so, dass für die Insassen des gestoßenen Fahrzeugs die Unfallschwere sinkt.

- 1) Führe einen Eingriff zur Trefferlagenänderung nach TL 10 durch.
- 2) Führe einen Eingriff zur Trefferlagenänderung nach TL 2 durch, wenn die ursprüngliche Trefferlage im Bereich des Vorderwagens liegt.
- 3) Führe eine Vollbremsung aus, wenn die Trefferlage im Bereich der Fahrgastzelle liegt und TL 10 nicht mehr zu erreichen ist.

B. Handle so, dass für die Insassen des stoßenden Fahrzeugs die Unfallschwere sinkt.

- 1) Führe eine Vollbremsung aus

Die Handlungen A und B sind leicht zum Widerspruch zu führen. Ein Dilemma ergibt sich definitiv in einer Situation, in der die Möglichkeit besteht nur A oder B ausführen zu 'können', nicht aber A und B. Aufgrund der generellen Pflicht 'sollen' jedoch beide Handlungen, also A und B, ausgeführt werden.

Nach Williams (1981, Kapitel 8) ergibt sich aus der Pflicht nicht automatisch die Verpflichtung immer A und B auszuführen, jedenfalls wenn es nicht möglich ist. Es besteht keine moralische Schuld wenn man eine Handlung unterlässt, weil sie schlichtweg nicht möglich ist. Trotzdem ergibt sich aus der Nebenwirkung bzw. der Unterlassung ein moralisches Übel. Die (moralische) Bewertung dieses mitverschuldete moralische Übels hängt von der Perzeption

ab. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich beim Vergleich der Güter, die zur Legitimation genutzt werden. Beim Abwägen zwischen A und B wird zwar der gleiche Maßstab verwendet (Verletzungsschwere eines Menschen) aber die Menschenwürde ist in Deutschland per Grundgesetz als unantastbar definiert und damit prinzipbedingt moralisch gar nicht abwägbar. Zudem macht es einen Unterschied, ob man dieses Dilemma charakterisiert und beschreibt, ja sogar Lösungen in Form eines Flussdiagramms oder einer Priorisierung in Form einer Entscheidungsvorschrift entwirft oder nicht, weil dadurch die ethische Entscheidung standardisiert wird. Anstelle des Bestrebens Trefferlagen im Bereich der Fahrgastzelle zu vermeiden, tritt dann möglicherweise schnell die Akzeptanz, wenn keine Alternative vorhanden ist, das reine Notbremsen zu billigen. Diese Billigung lässt sich dann nicht mehr in richtig oder falsch unterscheiden. Diese Form der Legitimation ist daher ein Irrweg, der Ausnahmen zur Regel macht. Einmal standardisiert, müssen sich Einzelfälle dann nicht mehr vor der Norm rechtfertigen. Ein derartiger Eingriff wäre damit per se immer als richtig anzusehen, wie das heute in der Rechtspraxis für ABS- und ESP-Eingriffe gehandhabt wird.

In einer Situation muss aber zwangsläufig eine Priorisierung zwischen A und B erfolgen. Man ist also beiden Handlungsweisen verpflichtet und kann sie dennoch in einer konkreten Situation nicht gleichzeitig beide verwirklichen. Erhebt man den Schutz des gestoßenen Fahrzeugs, weil es sensibler bezüglich der Trefferlage ist, zur Priorität, hebt das nicht die Pflicht zur Handlung B auf. Man ist also in der Pflicht, gleichzeitig soviel von A und B auszuführen wie möglich ist. Es ist daher nicht logisch inkonsistent von jeder Handlung nur das zu tun was möglich ist. Dafür muss jedoch eine Abwägung stattfinden, wieviel jeweils getan werden kann. Diese Herangehensweise führt wiederum zur angesprochenen Problematik der Abwägbarkeit.

Für diese Art der Dilemmata zwischen Pflichtverletzung und Zurechnung moralischer Verantwortung gibt es das Prinzip der doppelten Wirkung (PDW). PDW entstammt der christlichen Theologie und wurde ursprünglich verwendet, um das Dilemma einer Notwehr mit Tötungshandlung zu entscheiden.<sup>199</sup> Das Ziel ist es, derartige Dilemmata eindeutig aufzulösen und generelle Handlungsvorschriften für einen bestimmten Typ an Situationen zu

---

<sup>199</sup>Eine Tötung steht im Gegensatz zum 5. Gebot: „Du sollst nicht töten“.

geben. Es löst damit nicht das eigentliche Dilemma. Das bleibt aufgrund der konfligierenden Pflichtverletzungen weiter bestehen. Im Sinne der Grundlage einer Ethik kann es jedoch die Handlungsweise für einen Typ an Situationen legitimieren.<sup>200</sup> Die Zulässigkeit ist nach Schockenhoff (2007, Abschnitt 3.1.bb) an vier Kriterien gebunden, die Fischer et al. (2008, Abschnitt 5.6) ausführlicher formulieren als:

1. "Die Handlung muss für sich betrachtet, d.h. unter Ausklammerung ihrer Nebenfolgen, moralisch richtig, geboten oder gut sein, oder sie darf doch zumindest nicht bereits an sich selbst moralisch falsch oder schlecht sein."
2. "Die Intention des Handelnden muss auf die Realisierung dieser Handlung bzw. auf deren Ziel gerichtet sein, und sie darf nicht auf die Herbeiführung der Nebenfolgen gerichtet sein."
3. „Die Realisierung der Handlung bzw. die Erreichung des mit ihr erstrebten Ziels muss unabhängig von den Nebenfolgen sein.“
4. „Es muss eine Verhältnismäßigkeit bestehen zwischen dem, was durch die Handlung realisiert oder erreicht werden soll, und den Nebenfolgen, die dafür in Kauf genommen werden müssen. Die Handlung und das mit ihr erstrebte Ziel muss m.a.W. einen hinzureichenden Grund für die Inkaufnahme der Nebenfolgen liefern.“<sup>201</sup>

Das PDW kann damit als Begründung in Anspruch genommen werden, einen Typ an Handlung in bestimmten Situationen zu legitimieren. Zusätzlich kann es als „Rechtfertigungsinstanz“, wann Handlungen vertretbar sind und ausgeführt werden dürfen, verwendet werden. Dabei werden die Nebenfolgen einer Handlung oder das Unterlassen einer Handlung (um weitere Nebenfolgen zu vermeiden) nicht legitimiert, sondern nur deren Inkaufnahme, wenn zwischen zwei Übeln entschieden werden muss (Fischer et al. 2008, Abschnitt 5.6).

---

<sup>200</sup>Im Gegensatz zu konsequentialistischen Ansätzen wird nicht das Ergebnis oder gar die üble moralische Nebenwirkung legitimiert, sondern die Handlung an sich.

<sup>201</sup>Alle vier Kriterien zitiert aus Fischer et al. (2008, Abschnitt 5.6).

Es bleibt die Frage, ob die oben formulierten Handlungen (A und B) die vier Kriterien erfüllen. Für den Fall einer unvermeidbaren Querverkehrskollision sehe ich diese Kriterien als erfüllt an. Es steht das körperliche Wohl aller Beteiligten automatisch auf dem Spiel. Daher muss analog zu einer Notwehrsituation auch über dieses Gut geurteilt werden dürfen. Zudem entscheidet man sich nicht grundsätzlich für oder gegen einen Beteiligten. Jede Handlung, insbesondere aber auch das nicht Handeln, verletzt die gegebene Pflicht zur Unfallschwerereduktion. Damit ist eine wichtige Prämisse erfüllt, um den Eingriff anhand der Risikofunktionen zu entscheiden, vor allem wenn das Handlungskonzept jeweils nur eine gute oder zumindest indifferente Wirkung auswählt. Die Nebenfolgen werden explizit versucht zu minimieren.

Dafür wird in Abschnitt 4.2.3 ein Flussdiagramm vorgestellt, nach dem eine Dilemmaentscheidung herbeigeführt werden kann, die gesellschaftlich konsensfähig sein sollte. Wichtig ist dafür die Unterscheidung in zwei Handlungsebenen. Die 1. Handlungsebene strebt die Vermeidung der Fahrgastzelle und Zieltrefferlage TL 10 an. Diese Art des Eingriffs ist, bezogen auf die vier Kriterien, legitim. Nur für Fälle, bei denen TL 10 nicht erreicht werden kann oder während des Eingriffs unerreichbar wird, ist ein reines Notbremsen vorgesehen. Dieses Notbremsen stellt keine Bevorzugung der Handlung B und seiner Ausprägung B.1 dar. Im Falle, dass ein Eingriff trotz vorheriger Abwägung zu einer unvermeidbaren Kollision mit der Fahrgastzelle führt, ist eine Vollbremsung für beide Fahrzeuge die bestmögliche Handlung.

#### 3.6.3 Zusammenfassung und Bewertung

Für das System zur Trefferlagenänderung im Querverkehr wird versucht zu den in Abschnitt 3.6.2 aufgestellten Fragen Antworten zu geben. Das hier vorgestellte Handlungskonzept wurde – soweit möglich – nach dem Stand der Wissenschaft und Technik abgesichert. Die resultierenden Handlungen zur Trefferlagenänderung auf die Vorder- und Hinterachse sind so angelegt, dass sie zu keiner Verschiebung innerhalb der Gruppe der Geschädigten führen. Dies wird dadurch erreicht, dass für jede Ausgangstrefferlage eine Einzelfallberechnung durchgeführt wird, um zu berechnen, welche Trefferzonen erreicht werden können. Damit wird für alle am Unfall beteiligten Personen versucht die Verletzungsschwere zu minimieren oder zumindest nicht zu er-

höhen. Die dafür verwendeten Annahmen sind weit davon entfernt „perfekt“ zu sein, stellen aber einen deutlich differenzierteren Beitrag im Vergleich zum bisherigen Dogma, dass eine Geschwindigkeitsreduktion auch automatisch zu einer Verletzungsschwererereduktion führt, dar. Für den Fall einer unvermeidbaren Kollision konnte exemplarisch in Probandenstudien gezeigt werden, dass der Nutzen von einer Mehrheit der Teilnehmer positiv bewertet wurde.<sup>202</sup> Durch Instruktion und vorherige Information über das System und seine Grenzen kann der Fahrer bewusst (opt-in) das Systemverhalten zulassen, wenn es seinen moralischen Vorstellungen entspricht. Die Auswirkungen eines Eingriffs sind vergleichbar mit einer reflexhaften Notbremsung. Durch die gezielte Ansteuerung der steifen Trefferlage am gestoßenen Fahrzeug ist sie entsprechend sogar vorteilhafter für dessen Insassen, als eine menschliche Reaktion oder unterlassene Reaktion.

Abschließend lässt sich die Definition von Naab & Reichart (1998) erweitern: Der Mensch kann als verantwortlich handelnde Person gesehen werden, der bestimmte Aspekte der Fahraufgabe delegiert und so von der praktischen Ausführung entbunden wird, bei gleichzeitiger Verantwortung für die Handlung des automatischen Systems. Grundlage dafür ist eine Übereinstimmung der moralischen Grundsätze zwischen Fahrer und System, sowie eine Beschränkung auf Handlungen, die keinen am Unfall Beteiligten vorsätzlich benachteiligen und den vier Kriterien des PDW genügen. Damit müssen etwaige Umverteilungen in der Gruppe der Unfallopfer statistisch so abgesichert sein, dass keine Gruppe benachteiligt wird, sondern alle in ihrem Verkehrsrisiko profitieren.<sup>203</sup>

**Anforderung 24 (Überprüfbarkeit der implementierten Moral)** *Das System muss vor Fahrtbeginn darstellen können, wie es moralische Fragestellungen entscheidet.*

---

<sup>202</sup>Vergleiche Abschnitt 5.2.

<sup>203</sup>Vergleiche auch Homann (2005, Abschnitt 3).

# Kapitel 4

## Konsistente Funktionsdefinition

Kapitel 3 beschreibt die grundlegenden Anforderungen an ein System zur Unfallschwereminderung im Querverkehr. Die Umsetzung dieser allgemeinen Anforderungen in konkrete Funktionalität ist auf verschiedene Arten möglich. Im Folgenden wird eine vollständige Funktionsdefinition zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr für Fahrzeug-Fahrzeug Kollisionen vorgestellt.

Die Funktion betrifft nur das stoßende Fahrzeug und ist im Wesentlichen auch in Heck et al. (2014a;b) beschrieben. Ein Verfahren aus Sicht des gestoßenen Fahrzeugs ist eingereicht und wird voraussichtlich 2016 offengelegt (Heck & Junge 2016). Im Sinne der Definition von Reschka et al. (2015) handelt es sich dabei um eine FCVX-Funktion, die Warnung (FVCW), reversible Pre-Crash Maßnahmen (FVCC), Unfallfolgenminderung (FVCM) und Unfallvermeidung (FVCA) ermöglicht. Der Fokus liegt auf Eingriffen zur Unfallfolgenminderung unvermeidbarer Kollisionen. Abschnitt 4.2 stellt das Verfahren zur Eingriffsentscheidung vor, bei dem die Entscheidung zwischen Unfallfolgenminderung und -vermeidung situativ anhand des Verletzungsrisikos bestimmt wird. Damit ist eine klare Abgrenzung nicht mehr eindeutig möglich. Warnung und Pre-Crash Maßnahmen werden für ein Seriensystem herstellerspezifisch ausgelegt und sind vor allem zur vollständigen Einordnung angegeben. Basierend auf den bisher formulierten Anforderungen wird beispielhaft gezeigt, wie diese konkretisiert und umgesetzt werden können.

Tabelle 4.1 fasst die Anforderungen aus Kapitel 3 zusammen. Diese werden dafür nach funktionalen Anforderungen, funktionalen Einschränkungen (constraints) und nichtfunktionalen Anforderungen gruppiert. Die funktionalen Anforderungen (FA) beschreiben die wesentlichen Bedingungen zur Un-

fallfolgenminderung. Die in Kapitel 3 herausgearbeiteten notwendigen Anforderungen für eine technische Umsetzung sind als funktionale Einschränkungen (FE) angegeben. Der Unterschied zwischen den funktionalen Einschränkungen und den funktionalen Anforderungen besteht darin, dass die Einschränkungen Randbedingungen oder Sachzwänge für eine konkrete Umsetzung beschreiben und damit zukünftigen Änderungen unterliegen können bzw. auch auf anderem Wege erfüllt werden können. Die funktionalen Anforderungen, die sich aus der Unfallforschung ableiten, stellen hingegen auf absehbare Zeit fest zu erfüllende Anforderungen an ein System zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr dar, die im Handlungskonzept bzw. Entscheidungsverfahren berücksichtigt werden müssen. Die nichtfunktionalen Anforderungen (NA) beziehen sich auf die technische Umsetzung im Gesamtfahrzeug.

Wesentlich für das Systemverhalten ist die Beschreibung des Handlungsablaufs. Dieser ideale Ablauf wird mittels eines geeigneten Entscheidungsverfahrens situativ umgesetzt. Daher kommt neben der Beschreibung des Handlungsablaufs der Argumentation der Eingriffsentscheidungen eine wesentliche Bedeutung zu. Diese Begründungen sind unabhängig vom eingesetzten Verfahren und stellen eine Verbindung zwischen Anforderung und realer Umsetzung her.



**Tabelle 4.1:** Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr. Die Reihenfolge ist ein Versuch, diese hinsichtlich ihrer Bedeutung (innerhalb der Art) zu sortieren. Die genaue Erläuterung findet sich im jeweils genannten Abschnitt. Abkürzungen: funktionale Anforderung (FA), funktionale Einschränkung (FE), nichtfunktionale Anforderung (NA)

Art	Nr.	Bezeichnung	Abschnitt
FA	21	Reduktion der Unfallschwere	3.5.4
FA	4	Vermeidung der Fahrgastzelle	3.2.2
FA	1	Zieltrefferlage (TL 10)	3.1.2
FA	2	Alternative Trefferlage (TL 2)	3.1.3
FA	15	Kontinuierliche Trefferlagenüberwachung	3.4.3
FA	3	Reduktion der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v$	3.1.3
FA	5	Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit $v_{Kol}$	3.2.2
FA	22	Warnung vor Eingriff	3.5.4
FA	20	Übersteuerbarkeit	3.5.2
FE	7	Detektion der Fahrzeuglänge	3.3.1
FE	6	Detektion der Fahrgastzelle	3.3.1
FE	12	Erforderliche Positionsgenauigkeit	3.3.2
FE	11	Reibwertschätzung	3.3.2
FE	9	Verdeckung - Reichweite	3.3.1
FE	8	Verdeckung - Öffnungswinkel	3.3.1
FE	10	Verdeckung - Einbauort	3.3.1
FE	17	maximale Geschwindigkeit	3.4.3
FE	13	maximale Eingriffsstärke am Lenkrad	3.3.3
NA	24	Überprüfbarkeit der implementierten Moral	3.6.3
NA	14	Definition der Systemgrenzen	3.4.2
NA	18	Eindeutigkeit der Systemauslösung	3.4.3
NA	19	Zulassungsfähigkeit	3.5.1
NA	23	Produktprozess nach Stand der Wissenschaft & Technik	3.5.4
NA	16	Überprüfung bestehender Systeme	3.4.3

## **4.1 Handlungsablauf**

Dieser Abschnitt beschreibt das Handlungskonzept und den typischen Eingriffsablauf eines Systems zur Unfallfolgenminderung bei einer Gefahrensituation im Querverkehr in Anlehnung an die Beschreibung zum Längsverkehr in Abschnitt 2.2.3. Im Querverkehr muss dabei zwischen zusätzlichen Fällen anhand der Ausgangstrefferlage unterschieden werden. Diese beeinflusst neben dem Kollisionsrisiko auch die Verletzungswahrscheinlichkeit. Die (Brems-) Eingriffe müssen daher genauer differenziert werden als bisher im Längsverkehr üblich.

Für die beschriebenen Eskalationsstufen kann eine Unfallschwereprognose genutzt werden, um das Risiko einer Situation zu bewerten und entsprechend angepasst zu warnen. Kommt es, durch Ausbleiben einer Fahrerreaktion, zu einem aktiven Eingriff, wird je nach Ausgangssituation entschieden, welcher Eingriff durchgeführt wird. Ausgehend von der Betrachtung der Warnungen (Abschnitt 4.1.1), werden in Abschnitt 4.1.2 die verschiedenen Ausgangssituationen gruppiert und Eingriffsziele erklärt. Für die Post-Crash Phase wird in Abschnitt 4.1.3 das Auslaufverhalten der einzelnen Trefferlagen besprochen. Die Auswirkungen von Fehlern werden in Abschnitt 4.1.4 diskutiert.

Reagiert der Fahrer, wird analog zum Längsverkehr zwischen einem Bremsmanöver und einem Ausweichversuch in Form eines Lenk- bzw. Beschleunigungsmanövers (über eine deutliche Druckerhöhung auf das Fahrpedal entsprechend den Seriensystemen) unterschieden. Bremsen wird vom System zu einer Zielbremsung angepasst, mit dem Ziel, das Fahrzeug vor dem Kollisionsort zum Stehen zu bringen oder eine geeignete Trefferlage (wie unter Abschnitt 4.1.2 beschrieben) anzusteuern. Lenken und gleichzeitiges Beschleunigen werden als Abbruchkriterien des automatischen Eingriffs gewertet und führen zu einer Freigabe der Bremse und damit zur Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer. Exemplarisch wird im Folgenden jede Stufe analog Abschnitt 2.2.3 einzeln vorgestellt. Das Entscheidungsverfahren zur Ausgabe der Warnung und Selektion der Handlung wird separat im nächsten Abschnitt vorgestellt, um zu verdeutlichen, dass die Phasen des Handlungskonzepts unabhängig von der konkreten Implementierung des Entscheidungsverfahrens sind. Es wird zudem bewusst auf eine zeitliche Darstellung analog zu Abbildung 2.9 verzichtet, da sich das Verfahren an

den Verletzungsrisikokurven orientiert. Für eine zeitliche Betrachtung wird beispielsweise auf die Arbeiten von Brännström et al. (2010); Sandblom & Brännström (2011); Brännström et al. (2011); Herrmann (2013) verwiesen.

#### **4.1.1 Warnungen – FVCW + FVCC**

Warnungen haben zum Ziel den Fahrer auf eine Gefahrensituation hinzuweisen. Die Warnung versucht somit den Fahrer in die Lage zu versetzen, die Situation zu verstehen und eine Handlung zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsfolgenminderung auszuführen. Dafür müssen die Warnungen zeitlich so früh wie möglich vor einer Kollision erfolgen, damit genügend Zeit für den Fahrer besteht, die Situation zu erfassen und zu verarbeiten (Anforderung 22, vgl. 3.6.3).

Die Warnung erhöht dabei zunächst die Anforderung an den Fahrer, da er diese zusätzlich zur Gefahrensituation plausibilisieren und verstehen muss.<sup>1</sup> Dies bedeutet, dass sowohl die Reihenfolge (Sequenz) der Warnungen, die Arten der Warnung (auditiv, visuell, haptisch) und eine mögliche Richtung der Warnung im Zusammenhang mit der Situationsentwicklung definiert werden sollten. Hesse et al. (2012) beschreiben ein MMI Konzept, bei dem verschiedene Assistenzsysteme integriert sind. Für den Querverkehr wurde eine Warnkaskade in Brockmann et al. (2012) beschrieben und getestet.

Es sollte daher vermieden werden, durch die Warnung eine Handlung auszulösen, die zu einer Erhöhung des Kollisionsrisikos führt. Die in Kapitel 3 als problematisch identifizierte Trefferlage innerhalb der Fahrgastzelle bei nur geringfügig reduzierter Kollisionsgeschwindigkeit erschwert die Entwicklung einer optimalen Warnstrategie im Querverkehr. Vor diesem Hintergrund sollte diskutiert werden, wie eine Warnung, die nicht mehr zu einer Unfallvermeidung führen kann, die Unfallfolgen beeinflusst. Das Auslösen einer rein reaktiven Bremsung durch den Fahrer über auditive, visuelle und haptische Warnungen analog zum Längsverkehr sollte, insbesondere unter

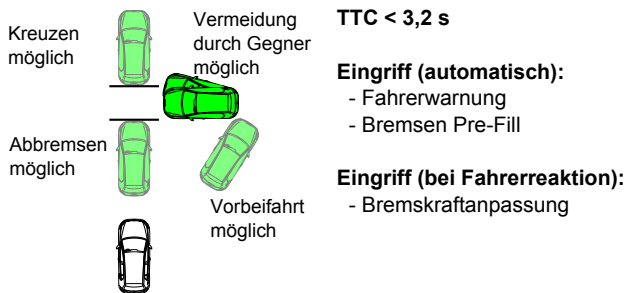
---

<sup>1</sup>Ziel sollte die Implementierung einer auf die Bedürfnisse und Möglichkeiten des Fahrers abgestimmten Warnstrategie sein. Beispielsweise sollte vermieden werden, in Situationen mit hoher Querbeschleunigung Füllstandswarnungen für Betriebsmittel auszugeben (Anforderung 18, vgl. 3.5.2).

Berücksichtigung einer möglichen Konditionierung auf diese Art der Warnung beim Notbremsen im Längsverkehr, überdacht werden. In Situationen, in denen eine vom Fahrer initiierte Vollbremsung zu einer Erhöhung der Verletzungswahrscheinlichkeit führt, ist daher zu überlegen ob diese nicht besser unterlassen wird (Anforderung 14, vgl. 3.4.2).

Durch den, im Gegensatz zum Längsverkehr, erhöhten Handlungsspielraum der am Unfall beteiligten Fahrzeuge besteht eine größere Unsicherheit bei der Bestimmung des Kollisionsrisikos. Diese erschwert damit das Warndilemma zusätzlich. Die Kritikalitätsbestimmung für den Querverkehr ist, wie schon beschrieben, nicht Gegenstand dieser Arbeit. Zur Darstellung und Verdeutlichung der Eskalationsstufen werden exemplarisch vier Vermeidungsoptionen und ein zeitlicher Abstand zur Kollision (TTC) gezeigt. Die Darstellung der ersten beiden Stufen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und wird in der Praxis herstellerabhängig ausgelegt werden.

### 1. Stufe – Warnung

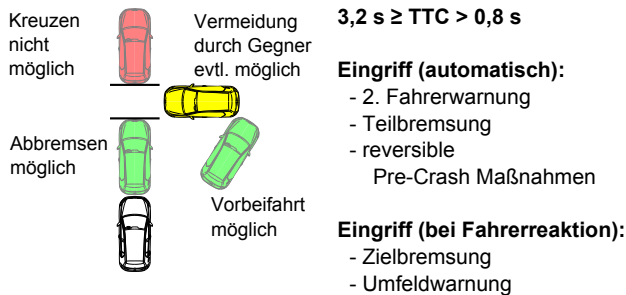


**Abbildung 4.1:** 1. Stufe des Handlungskonzepts zum Notbremsen im Querverkehr

Bei der Annäherung an ein Objekt wird vor der Kollision eine visuelle und auditive Warnung aktiviert. In dieser Phase kann auch ein Bremsruck oder ein leichter Gegendruck mittels haptischen Gaspedals erfolgen. Zugleich wird die Reaktionszeit der Bremse mittels Pre-Fill für ein erwartetes Bremsmanöver optimiert. Bei einer durch den Fahrer initiierten Bremsung wird die Parame-

trierung des Bremsassistenten geändert und damit der Bremsdruck automatisch verstärkt, um eine Kollision zu vermeiden (Zielbremsung). Zu diesem Zeitpunkt ist die weitere Entwicklung der Verkehrssituation noch mit einer hohen Unsicherheit behaftet und es bestehen alle Möglichkeiten zur Unfallvermeidung durch beide Fahrer. Neben einer Kritikalitätsbestimmung anhand eindimensionaler Zeitlücken (TTC) können auch probabilistische Verfahren zur Situationsanalyse und Aufenthaltsbestimmung<sup>2</sup> oder Verfahren, die Verletzungswahrscheinlichkeiten nutzen, verwendet werden.<sup>3</sup>

## 2. Stufe – Gefahrenwarnung



**Abbildung 4.2:** 2. Stufe des Handlungskonzepts zum Notbremsen im Querverkehr

Erfolgt keine Reaktion durch den Fahrer wird eine zweite Warnung und möglicherweise eine Teilbremsung initiiert. Diese hat zum Ziel den Fahrer zusätzlich zum Bremsen aufzufordern und damit die Zeitdauer bis zur Kollision zu verlängern. Die Teilbremsung wird nur ausgelöst, wenn die ent-

<sup>2</sup>Vergleiche beispielsweise Herrmann (2013, Kapitel 4.2).

<sup>3</sup>Im Falle eines dicht kreuzenden Fahrzeugs (eigenes Fahrzeug) zieht das ursprünglich querende Fahrzeug (gegnerisches Fahrzeug) im Feld häufig in Fahrtrichtung des Kreuzenden. Vergleiche Malaterre et al. (1988), Stańczyk et al. (2010) und Weber (in Bearbeitung). Dadurch kommt es zu einer längeren Trajektorie für das gegnerische Fahrzeug und die zeitliche Vermeidbarkeit wird erhöht. Gleichzeitig wird die zum Kreuzen benötigte Distanz länger (schlechtere räumliche Vermeidung). Inwiefern dieser Effekt die Distanzberechnung beeinflusst, muss in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

stehende Trefferlagenänderung über das Eingriffsverfahren aus Abschnitt 4.2 bezüglich der Verletzungswahrscheinlichkeit abgesichert werden kann (Anforderung 4, vgl. 3.2.2). Weitere reversible Maßnahmen werden zeitgleich, je nach Verfügbarkeit, analog zum Längsverkehr aktiviert. Dazu gehören reversible Gurtstraffer, das automatische Schließen der Fenster, eine Optimierung der Sitzposition und die Versteifung aktiver Federdämpfer im Fahrwerk. Im Falle einer Fahrerbremsung wird eine Zielbremsung ausgeführt, um eine Kollision zu vermeiden. Im Falle einer Lenkung durch den Fahrer wird, je nach Stärke, über eine Teilbremsung der zeitliche Abstand zum kreuzenden Fahrzeug vergrößert.

### 4.1.2 Eingriffe – FVCM + FVCA

Führen die Warnungen nicht zu einer Vermeidung des Unfalls und erhöht sich die Kritikalität der Situation, kann ein automatischer Eingriff erfolgen. Spätestens wenn eine Kollision unvermeidbar<sup>4</sup> ist, sollte ein automatischer Eingriff zur Senkung des Verletzungsrisikos stattfinden (Anforderung 21, vgl. 3.5.4). Dafür werden Eingriffe zur Trefferlagenänderung über die Brems- und Lenkanlage des Fahrzeugs ausgeführt. Die Performanz dieser Systeme für eine automatische Stellgrößenveränderung begrenzt die maximale Änderung und beschreibt, in Abhängigkeit der Bewegung des gestoßenen Fahrzeugs, die erreichbaren Zieltrefferlagen (Anforderungen 1 & 2, vgl. 3.1.2 & 3.1.3). Neben der Ausgangstrefferlage und den erreichbaren Zieltrefferlagen ist es für die Handlungsentscheidung wichtig, welche Trefferlagen aus Fehlern resultieren können. Dabei ist insbesondere die Vermeidung eines Treffers der Fahrgastzelle wichtig (Anforderung 6, vgl. 3.3.1). Des Weiteren sollten die Eingriffe zu einer Reduktion der Geschwindigkeitsänderung in der Kollision  $\Delta v$  (Anforderung 3, vgl. 3.1.3) sowie zu einer Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit  $v_{Kol}$  führen (Anforderung 5, vgl. 3.2.2). Die dabei zu beachtenden Unsicherheiten bezüglich des Reibwertes (Anforderung 11,

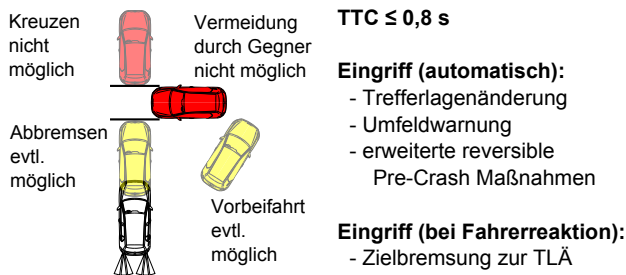
---

<sup>4</sup>Vergleiche Abbildung 3.28.

vgl. 3.3.2) und durch mögliche Fahrerhandlungen werden in Abschnitt 4.1.4 diskutiert (Anforderung 15, vgl. 3.4.3).

Im Längsverkehr muss für die Unfallvermeidung die gesamte Relativgeschwindigkeit durch einen Eingriff abgebaut werden. Mit steigenden Geschwindigkeiten braucht dieser Eingriff aufgrund des quadratischen Zusammenhangs mit der abzubauenen Energie eine größere Distanz bzw. Zeitlücke. Steht das getroffene Fahrzeug, muss die komplette Bewegungsenergie des stoßenden Fahrzeugs zur Unfallvermeidung abgebaut werden. Im Gegensatz dazu muss im Querverkehr nur eine ausreichende Zeitlücke durch den Systemeingriff erreicht werden. Die dafür benötigte Strecke/Zeit hängt zwar auch von der Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs ab, sie muss im Worst-Case allerdings nicht komplett abgebaut werden. Auch bei höheren Geschwindigkeiten ergibt sich damit die Möglichkeit zur Kollisionsvermeidung. Dies führt mit einem Entscheidungsverfahren, das in Abhängigkeit der Verletzungswahrscheinlichkeit auslöst, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten zu einem Bias in Richtung früherer Eingriffe und damit zur Unfallvermeidung.

### 3. Stufe – Trefferlagenänderung

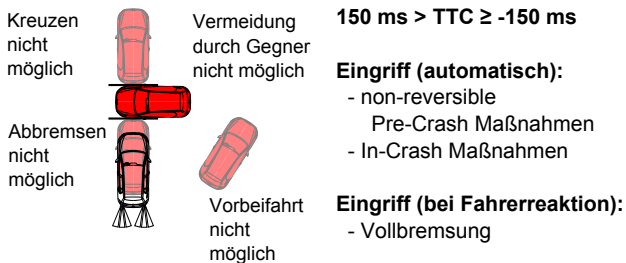


**Abbildung 4.3:** 3. Stufe des Handlungskonzepts zum Notbremsen im Querverkehr

Bleibt eine Fahrerreaktion aus, wird ab etwa 0,8 Sekunden vor der Kollision ein automatischer Eingriff eingeleitet. Dieser ist abhängig von der Trefferlage und den Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge. Entsprechend der

Systemauslegung kann der Eingriff eine Unfallvermeidung oder Unfallfolgenminderung zum Ziel haben. Die einzelnen Eingriffe werden in Abbildung 4.5 zusammengefasst dargestellt und anschließend im Einzelnen beschrieben. Gleichzeitig mit dem Eingriff wird eine Warnung des Umfelds über Brems- und Warnleuchten ausgelöst.<sup>5</sup>

### 4. Stufe – Crash



**Abbildung 4.4:** 4. Stufe des Handlungskonzepts zum Notbremsen im Querverkehr

Bei höheren Geschwindigkeiten und insbesondere bei sehr kurzen Zeiträumen vor der Kollision können non-reversible Maßnahmen zur Unfallfolgenminderung ausgelöst werden.<sup>6</sup> Die aus der maschinellen Wahrnehmung prädiizierte technische Unfallschwere kann zur gezielten Anpassung der Systeme der passiven Sicherheit genutzt werden.<sup>7</sup> Weitere Maßnahmen sind beispiels-

<sup>5</sup>In Anlehnung an den Längsverkehr ist noch zu untersuchen, ob eine Begrenzung der Verzögerung zur Absicherung gegen Auffahrunfälle sinnvoll ist. Dafür müsste eine Verletzungsrisikofunktion für den Querverkehr mit einer aus dem Längsverkehr verknüpft werden. Zunächst muss jedoch definiert werden, welchem Fahrzeug man Priorität einräumt (gestoßenem, eigenem oder auffahrendem). Es ist zu vermuten, dass für den Gestoßenen die Trefferlage am wichtigsten ist, wenn die Verletzungswahrscheinlichkeit aller am Unfall Beteiligten verringert werden soll. Ob bzw. inwiefern eine Trefferlagenänderung durch Bremsung durch ein auffahrendes Fahrzeug negiert wird, hängt vom Geschwindigkeitsbereich ab. Es ist zu vermuten, dass durch die Geschwindigkeitsbegrenzung bei Auslösung für den folgenden Verkehr keine überhöhten Verletzungsrisiken entstehen (Anforderung 3, vgl. 3.1.3).

<sup>6</sup>Vergleiche beispielsweise den „Brakingbag“ von Daimler (Mellinghoff et al. 2010).

<sup>7</sup>Vergleiche beispielsweise Meier et al. (2014b;a).



weise eine Rückdrehung des Lenkrades bzw. Drehung auf die Mittelstellung, um eine optimale Positionierung der Hände und Arme vor Aktivierung des Airbags zu erreichen (Heck & Wykowski 2013).

### **Einfluss der Steuerungsgrößen**

Die Eingriffe sind abhängig vom Abstand, den Geschwindigkeiten und den Beschleunigungen der beiden Fahrzeuge. Im Querverkehr ist neben den Fahrzeugabmessungen insbesondere die Abmessung der Fahrgastzelle relevant. Problematisch ist dabei die Unsicherheit bei der Bestimmung der Beschleunigungsveränderung. Die Beschleunigungsveränderung wird aufgrund der Präzision der eingesetzten Messverfahren und der schon prinzipbedingt notwendigen zeitlichen Komponente mit hoher Latenz bestimmt. Dadurch sind Handlungen des gestoßenen Fahrzeugs für das stoßende Fahrzeug zum Auslösezeitpunkt und während des Eingriffs nur zeitverzögert bestimmbar. Die Genauigkeit mit der diese Steuergrößen erfasst werden, ist abhängig von einer konkreten Realisierung. Durch den Handlungsraum des gestoßenen Fahrzeugs kann eine Trefferlagenabweichung jedoch niemals ausgeschlossen werden.

Unabhängig von einer möglichen Ursache wird in Abschnitt 4.1.4 eine Rückfallebene vorgestellt, die es ermöglicht auf Trefferlagenabweichungen während des eigentlich geplanten Eingriffs bestmöglich zu reagieren. Grundlage dafür ist eine kontinuierliche Trefferlagenüberwachung (Anforderung 15, vgl. 3.4.3). Die Möglichkeiten einen Eingriff anzupassen steigen mit der Frequenz der Trefferlagenüberwachung. Es erscheint allerdings nicht erforderlich millisekundengenau die Beschleunigungsänderungen des gestoßenen Fahrzeugs zu verfolgen.

Das gestoßene Fahrzeug hat zwar prinzipiell die Möglichkeit zum Lenken und Beschleunigen, die größte Abweichung kann es jedoch über eine Vollbremsung<sup>8</sup> erzeugen. Die maximale Abweichung hängt damit von der Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs und der TTC ab. Damit wirkt die Handlung des Gestoßenen entgegen der Handlung des Stoßenden und die Abweichung hängt vom Geschwindigkeitsverhältnis der beiden Fahrzeuge und

---

<sup>8</sup>Theoretisch führt eine kombinierte Vollbremsung mit Lenkung zu noch größeren Abweichungen. Vergleiche z.B. Abbildung 3.28.





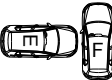



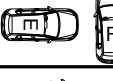
der jeweilig realisierbaren Verzögerung ab. Stoff & Liers (2013) geben die maximale Abweichung der Trefferlage durch die gegnerische Handlung und Fehler bei der Reibwertschätzung mit 0,4-0,5 m an.



Stoff & Liers (2013) betrachten primär die Möglichkeit zur Unfallvermeidung. Um ausreichend Sicherheit einzubauen, schlagen sie daher eine Veränderung der Zieltrefferlage durch frühere Eingriffszeitpunkte vor. Dieser Ansatz ist für Eingriffe zur Unfallfolgenminderung, die erst nach der Unvermeidbarkeit einer Kollision eingreifen sollen, ungeeignet.

Abschnitt 4.2.3 schlägt einen anderen Ansatz vor. Durch Evaluation aller möglichen zukünftigen Situationsverläufe bezüglich ihres Verletzungsrisikos kann bereits vor der Unvermeidbarkeit eingegriffen werden, wenn ein bestimmtes Verletzungsrisiko überschritten wird. Damit wird implizit wieder ein zeitlicher Puffer, wie von Stoff & Liers (2013) vorgeschlagen, verwendet. Durch die frühere Auslösung wird versucht sicherzustellen, dass die anvisierte Zieltrefferlage erreicht werden kann. Diese zeitliche Anpassung ist allerdings situativ angepasst und hängt vom Verletzungsrisiko ab. Das Verfahren zur Auslösung wird in Abschnitt 4.2 genauer vorgestellt.

Diese situative Anpassung verhindert nicht zwangsläufig, dass eine Trefferlagenänderung des Systems vollständig durch eine Vollbremsung des gegnerischen Fahrzeugs negiert wird. Es können damit Fälle auftreten, bei denen die resultierende Trefferlage unverändert der Ausgangstrefferlage entspricht. Dabei kann die Trefferlage auch im eigentlich unerwünschten Bereich der Fahrgastzelle liegen. Durch den Geschwindigkeitsabbau des stoßenden Fahrzeugs ist die resultierende Unfallschwere für diese Fälle jedoch geringer oder zumindest nicht höher als ohne Eingriff.

Abbildung 4.5 zeigt die adressierten Ausgangssituationen für die 3. Stufe. Je nach Ausgangslage kann das Entscheidungsverfahren einen Eingriff durchführen, der versucht die entsprechende Zieltrefferlage zu erreichen. Diese Situationen und dazugehörigen Eingriffe werden im Folgenden genauer erläutert. Dabei wird unterschieden zwischen Situationen, bei denen das System versucht die Unfallfolgen zu mindern und Situationen, bei denen es versucht einen Unfall zu vermeiden (Anforderung 24, vgl. 3.6.3).

Ausgangstrefferlage	Zieltrefferlage	Eingriffsart
Eigene Seite 	Nicht Teil des Handlungskonzeptes	Kein Eingriff
Vorderwagen 	TL2 - Rechter Längsträger trifft Vorderachse 	Zielbremsung Keine Lenkung
Vorderachse 	Kein Eingriff, da Risiko eines Fahrgastzellen-treffers zu groß	Kein Eingriff
Fahrgastzelle 	TL10 - Linker Längsträger trifft Hinterachse 	Zielbremsung Lenkung falls Bremsversatz nicht ausreicht
Hinterwagen 	Ausweichen am Heck vorbei (zeitlich) 	Vollbremsung evtl. Lenkung
Alle Trefferlagen	Ausweichen in den Stand oder zeitlich 	Vollbremsung Keine Lenkung

Legende:  Eigenes Fahrzeug  Fremdes Fahrzeug

**Abbildung 4.5:** Mögliche Eingriffe eines Systems zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr (inkl. Fälle zur Unfallvermeidung) in Anlehnung an Heck et al. (2014a;b). Treffer in die eigene Seite werden nicht adressiert. Für alle Trefferlagen ist prinzipiell eine Unfallvermeidung durch Abbremsen in den Stand (räumlich) oder durch Erzeugen einer entsprechenden Zeitdifferenz (zeitlich) möglich. Diese hängt vom Eingriffszeitpunkt und der benötigten Beschleunigung ab. Für Ausgangstrefferlagen im Bereich des Hinterwagens ist dieses Ausweichen auch mit zusätzlicher Lenkung möglich. Abkürzungen: eigenes Fahrzeug (E), fremdes Fahrzeug bzw. gestoßenes Fahrzeug (F), Trefferlage (TL)

### Unfallfolgenminderung

Bei der Unfallfolgenminderung werden drei Eingriffsmöglichkeiten unterschieden. Diese hängen von der Ausgangstrefferlage und dem geschätzten Reibwert ab. Das Verfahren orientiert sich dabei an der Risikokurve aus Abbildung 3.9. Da eine Verschiebung der Trefferlage immer mit Unsicherheiten verbunden ist, wird bei Ausgangstrefferlagen im Bereich des Vorderwagens (TL 1 - TL 2) maximal eine Bremsung mit Zieltrefferlage TL 2 durchgeführt. Für TL 3 erfolgt kein weiterer Eingriff, da die Gefahr eines Fahrgastzellentreffers zu groß ist. Zwar ist je nach Situation bei rechtzeitiger Auslösung eine Verschiebung von TL 3 nach TL 10 möglich. Die Wahrscheinlichkeit, durch eine fehlerhafte Reibwertschätzung oder durch eine Bremsung des gestoßenen Fahrzeugs TL 10 nicht zu erreichen, ist dabei jedoch gleichzeitig maximal. Ein Treffer im vorderen Bereich der Fahrgastzelle bedeutet zudem ein Maximum an Verletzungswahrscheinlichkeit. In Summe wird das Risiko einer Verschiebung durch den kritischen Bereich der Fahrgastzelle als hoch bewertet.

Befindet sich hingegen die ursprüngliche Trefferlage zwischen TL 3 und TL 9, wird eine Bremsung mit Zieltrefferlage TL 10 durchgeführt. Dabei wird auch bei geringen Reibwerten gebremst. Diese Eingriffe sind in jedem Fall für die Insassen bezüglich des Verletzungsrisikos günstig. Für die Insassen in der vorderen Sitzreihe ist die durch den Eingriff reduzierte Intrusion im vorderen Fahrzeugteil vorteilhaft. Durch die reduzierten Geschwindigkeiten ( $\Delta v$  und  $v_{Kol}$ ) sinkt das Verletzungsrisiko zusätzlich. Für die Insassen der hinteren Sitzreihen sind die durch den Eingriff reduzierte Geschwindigkeitsänderung in der Kollision ( $\Delta v$ ) und die reduzierte Kollisionsgeschwindigkeit ( $v_{Kol}$ ) in jedem Fall vorteilhaft. Wird TL 10 erreicht, sinkt zusätzlich die Intrusion für die 2. Sitzreihe.

Ein kombinierter Eingriff mit der Lenkung findet für Ausgangstrefferlagen im Bereich zwischen TL 3 und TL 6 statt, bei denen nur mit sehr starken Bremseneingriffen TL 10 erreicht werden kann. Zusätzlich wird ein kombinierter Eingriff bei geringen Geschwindigkeiten des gestoßenen Fahrzeugs durchgeführt, da in diesen Fällen die Trefferlagenänderung über die Bremsung sehr gering ist. Bei kombinierten Eingriffen muss sichergestellt werden, dass es durch den Lenkeingriff nicht zu einer Unfallvermeidung kommt, da

dieser bei vollem Lenkeinschlag möglicherweise für den Fahrer schwer zu kontrollieren ist.

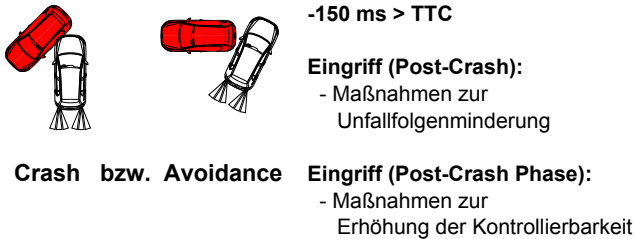
### **Unfallvermeidung**

Zur Unfallvermeidung werden zwei Möglichkeiten unterschieden, zum einen das Bremsen in den Stand (räumlich) und zum anderen die Vermeidung durch Passieren hinter dem kreuzenden Fahrzeug (zeitlich). Ob ein Anhalten vor Erreichen des Kollisionsortes möglich ist, hängt im Wesentlichen von der Geschwindigkeit bei Auslösung, der TTC, dem Reibwert, der verwendeten Bremsanlage und der verwendeten Reifen ab. Analog zu den geringen Relativgeschwindigkeiten kann ein Anhalten bei geringer eigener Geschwindigkeit möglich sein. Bei höheren Geschwindigkeiten – die zu hohen Verletzungsrisiken führen – und bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten des querenden Fahrzeugs kann, aufgrund des hohen Verletzungsrisikos, ein früherer Bremseneingriff erfolgen. Dieser hat zum Ziel eine Zeitlücke zu produzieren, bei der das querende Fahrzeug den berechneten Kollisionsort komplett passiert hat und führt damit zu einer Unfallvermeidung hinter dem kreuzenden Fahrzeug. Abbildung 3.28 zeigt für die angegebenen Annahmen beispielhaft die resultierende minimale TTC, bei der ein Eingriff erfolgen muss.

### **Post-Crash**

Unabhängig von der Art des Eingriffs sollten nach einer Kollision sowie nach einer verhinderten Kollision bzw. Beinahekollision Post-Crash Maßnahmen durchgeführt werden. Diese sind vergleichbar mit denen im Längsverkehr und dienen der Unfallfolgenminderung bzw. der Verhinderung weiterer Unfälle.

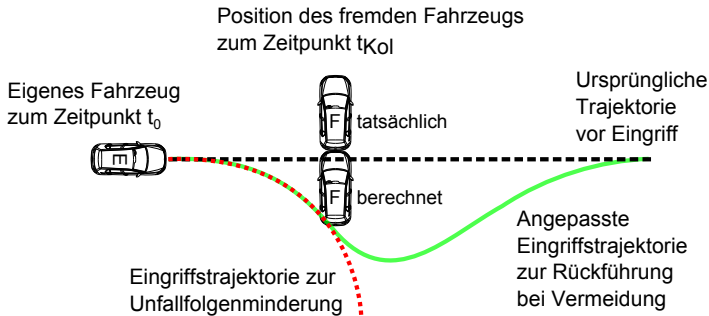
## 5. Stufe – Post-Crash bzw. Post-Crash Phase



**Abbildung 4.6:** 5. Stufe des Handlungskonzepts zum Notbremsen im Querverkehr

Die Post-Crash Phase kann in zwei Fälle unterteilt werden. Im ersten Fall kommt es zur Kollision. Analog zum Längsverkehr können Post-Crash Maßnahmen wie beispielsweise Multikollisionsbremse oder eCall zur Unfallfolgenminderung aktiviert werden. Im zweiten Fall kommt es trotz antizipierter Kollision nicht zum Unfall. Mögliche Gründe sind beispielsweise Fehlauslösungen oder Gegnerhandlungen, die zur Unfallvermeidung geführt haben. In diesem Fall müssen Maßnahmen durchgeführt werden, um die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs für den Fahrer zu erhöhen und etwaige automatische Eingriffe zu kompensieren und zu erklären.

Heck & Junge (2014a;b) beschreiben ein System zur Erweiterung der Lenkeingriffe durch Rückstelltrajektorien für den Fehlerfall. In Abbildung 4.7 ist ein exemplarischer Verlauf dargestellt. Dabei wird zunächst ein Lenkeingriff zur Trefferlagenänderung vor einer unvermeidbaren Kollision durchgeführt. Der Eingriff ist zur Maximierung des erreichten Versatzes derart stark, dass er im Falle einer Kollisionsvermeidung zum Abkommen von der Fahrbahn führen könnte. Um die Kontrollierbarkeit für den Fahrer zu erhöhen, wird die Trajektorie daher so angepasst, dass nach dem Überschreiten der Kollisionszeit (plus einer Karenzzeit) ein entgegengerichtetes Lenkmanöver ausgeführt wird.



**Abbildung 4.7:** Beispielhafte Erweiterung einer Eingriffstrajektorie für eine Rückführung in die ursprüngliche Fahrttrajektorie nach Heck & Junge (2014a;b). Ziel ist es, bei einer Unfallvermeidung ein Abkommen von der Fahrbahn zu verhindern und die Beherrschbarkeit für den Fahrer zu erhöhen, beispielsweise bei Fehlauflösungen (false-positive) oder im Falle einer Beschleunigung des fremden Fahrzeugs. Abkürzungen: eigenes Fahrzeug (E), fremdes Fahrzeug bzw. gestoßenes Fahrzeug (F)

## Kooperative Verfahren

C2C Kommunikation zwischen den beteiligten Fahrzeugen bietet eine Reihe von erweiterten Möglichkeiten, die hier separat diskutiert werden sollen. Zunächst können über Botschaften zwischen den Fahrzeugen Informationen ausgetauscht werden, die zur Berechnung des Verletzungsrisikos relevant sind. Dies betrifft neben Daten zum Fahrzeug, Gewicht etc. vor allem die Belegung der jeweiligen Sitzplätze. Wenn bekannt ist, welche Sitzplätze im gestoßenen Fahrzeug belegt sind, erweitert sich möglicherweise der Handlungsraum des stoßenden Fahrzeugs. In Fällen, bei denen nur der Fahrerplatz belegt ist, kann beispielsweise ein Eingriff der nur TL 9 (und nicht mehr TL 10) erreicht durchgeführt werden.

Der Austausch dieser Informationen bietet gleichzeitig ein Missbrauchspotenzial. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn durch manipulierte Belegungsinformationen das Verhalten anderer Fahrzeuge gezielt zum eigenen Vorteil gesteuert wird. Es muss daher ausgeschlossen werden, dass durch die Kooperation nachteilige Situationen für einzelne Unfallbeteiligte entstehen.

Das Entscheidungsverfahren aus Abschnitt 4.2.3 bietet durch die Vergleichsmöglichkeiten des Verletzungsrisikos einen Ansatz, um Missbrauch entgegenzuwirken.

In der Zukunft bietet sich auch die Möglichkeit kooperativ den Eingriff abzustimmen. Beispielsweise kann das gestoßene Fahrzeug eine Notbremsung unterlassen oder sogar beschleunigen, um in Verbindung mit der Vollbremsung des stoßenden Fahrzeugs eine Unfallvermeidung zu erreichen. Fraglich ist zurzeit durch wen bzw. wie diese Kooperation gesteuert wird. Im Hinblick auf das offensichtliche Missbrauchspotenzial ist eine wichtige Frage, wer verantwortlich für das Fahrzeugverhalten ist. Neben diesen grundlegenden Fragen sind auch noch technische Details wie einheitliche Protokolle und Nachrichtenformate zu definieren. Im Fall der kooperativen Unfallfolgenminderung sind einheitliche Bewertungsmaßstäbe eine weitere Voraussetzung.

### **4.1.3 Auslaufverhalten nach der Kollision**

Das Auslaufverhalten nach der Kollision wird durch die Unfallkonstellation beeinflusst. Es beschreibt wie und wohin sich die beiden Fahrzeuge nach der Kollision bewegen. Ziel bei der Betrachtung des Auslaufverhaltens ist es sicherzustellen, dass das Handlungskonzept für die Trefferlagenänderung keine wesentliche Verschlechterung des Auslaufverhaltens produziert. In Schaper (2012) wurde ein Modell erstellt, das die, mit dem hier vorgeschlagenen Handlungskonzept, durchführbaren Änderungen analysiert und berechenbar macht. Dabei muss ganz klar gesagt werden, dass es sich hier um einen ersten Schritt handelt, um abzusichern, dass keine Veränderungen erfolgen, die die Trefferlagenänderung im Querverkehr grundsätzlich in Frage stellen.<sup>9</sup>

Als Bewertungskriterium wurde das Risiko des Verlassens der Fahrbahn analysiert, da es durch Treffer im Bereich des Hinterwagens vermehrt zum Schleudern des gestoßenen Fahrzeugs kommt. Dieses führt zu einem verstärkten Geschwindigkeitsabbau, aber auch zu einer Abweichung von der ursprünglichen Fahrtrajektorie. Dadurch entsteht das Risiko die Fahrbahn zu verlassen und einer anschließenden sekundären Kollision, beispielsweise mit ortsfesten Hindernissen. Daher wurde zusätzlich bewertet, wie hoch der Ge-

---

<sup>9</sup>Für einen Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen siehe Schaper (2012, Kapitel 5).



schwindigkeitsabbau durch das Schleudern ausfällt und beurteilt, wie hoch das Verletzungsrisiko im Worst-Case einer zweiten Kollision ist. Durch den Vergleich des Auslaufverhaltens mit und ohne Eingriff bzw. verschiedener Eingriffe konnten einige grundlegende Zusammenhänge festgestellt werden, die hier kurz zusammengefasst werden sollen und die in die Kennfelder zur Eingriffsentscheidung in Abschnitt 4.2 eingeflossen sind. Für die Berechnungen wurden Gewichtsverhältnisse, Reibwert und Anstoßwinkel variiert, um sowohl eine gewisse allgemeine Aussagekraft wie auch eine Bewertung der Anstoßwinkeländerung durch die Lenkeingriffe zu ermöglichen. Die Variation über die Einflussparameter ergab jedoch nur Differenzen im Bereich der Bewertungsgenauigkeit.

Die Schnittmenge des Aufenthaltsraums mit und ohne Kollision ist für beide Fahrzeuge bei Trefferlage im Bereich des Vorderwagens und des Schwerpunktes des gestoßenen Fahrzeugs in etwa gleich groß. Für beide Fahrzeuge sinkt die Überdeckung, je weiter die Trefferlage in Richtung des Hecks wandert. Je weiter entfernt die Trefferlage vom Schwerpunkt, desto geringer ist der Geschwindigkeitsabbau in der Kollision. Bei Treffern im Heckbereich kommt es jedoch zum Schleudern des gestoßenen Fahrzeugs und damit zu einem erhöhten Geschwindigkeitsabbau, der die Aufprallgeschwindigkeit für eine sekundäre Kollision deutlich senkt. Dieser Effekt überkompensiert die stärkere Abweichung von der ursprünglichen Trajektorie, so dass die überquerte Schnittmenge zum Aufenthaltsraum ohne Kollision wieder steigt.

Für das stoßende Fahrzeug ist die Post-Crash Geschwindigkeit auf Höhe des Schwerpunkts des gestoßenen Fahrzeugs minimal. Je weiter die Trefferlage nach hinten wandert, desto höher ist die Post-Crash Geschwindigkeit und damit auch das Risiko bei einer sekundären Kollision. Daher ergibt sich für das stoßende Fahrzeug eine geringere Aufenthaltsraumüberdeckung für die Randbereiche und damit ein erhöhtes Risiko für eine sekundäre Kollision.

Zusammengefasst sind die Trefferlagen TL 2 und TL 10 für beide Fahrzeuge bezüglich des Auslaufverhaltens gut geeignet.<sup>10</sup> Für das stoßende Fahrzeug beschränkt der Bereich (TL 2 - TL 10) die Trefferlage auf Bereiche, die bezüglich der Schwere einer sekundären Kollision besser bewertet worden sind. Für das gestoßene Fahrzeug ist insbesondere die Verschiebung auf TL 10

---

<sup>10</sup>Vergleiche Schaper (2012, Kapitel 4.3).

günstig. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Trefferlagen im Vorderwagen fallen für das gestoßene Fahrzeug insgesamt sehr gering aus. Daher ist eine eindeutige Bewertung nicht möglich bzw. aufgrund der geringen Unterschiede zumindest keine grundsätzliche Verschlechterung zu erwarten.

#### **4.1.4 Auswirkungen von Fehleingriffen**

Fehleingriffe können verschiedene Ursachen haben.<sup>11</sup> Dabei sollen in diesem Abschnitt nicht die Ursachen betrachtet werden, sondern die Auswirkungen, die durch Eingriffe entstehen können, bei denen die Situation bzw. die Situationsentwicklung anders verläuft als vom System berechnet. Gekennzeichnet sind diese Eingriffe dadurch, dass sie bei einer a posteriori Betrachtung als fehlerhaft bzw. nicht zweckdienlich im Sinne der Unfallfolgenminderung bezeichnet würden.

Die in Tabelle 3.6 vorgestellte Gefahren- und Risikoanalyse bildet die Grundlage zur Bewertung gerechtfertigter aber fehlerhafter Eingriffe. Die Darstellung in diesem Abschnitt ist granularer, um zu verdeutlichen welche Fälle im Einzelnen auftreten können. Am Ende dieses Abschnitts werden Lösungen (auf Basis von Abschnitt 3.1) vorgeschlagen, um diese Fehler bestmöglich im Handlungskonzept abzufangen.

Um die Möglichkeiten der Fehleingriffe abstrakter zu beschreiben und hinsichtlich ihrer Auswirkungen bewerten zu können, werden diese über ein Tupel aus 'Geschwindigkeitsabweichung zur geplanten Kollisionsgeschwindigkeit' und 'Trefferlagenabweichung zur geplanten Trefferlage' beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer entsprechenden Abweichung kommt, wird als Wahrscheinlichkeit  $P(\delta v_{Kol}, \delta TL)$  angegeben. Als ideal wird ein Zustand angenommen, bei dem die Abweichungen null sind. Die zur Abweichung führenden Größen können entweder über entsprechende Wahrscheinlichkeiten formuliert werden oder sich implizit schon über die Eintrittswahrscheinlichkeit ausdrücken. Damit kann für jeden Ausgangszustand ( $v_{Kol}$ ,  $TL$ ) eine Eintrittswahrscheinlichkeit für mögliche Abweichungen berechnet werden. Diese sind anhand einer geeigneten Risikofunktion hinsicht-

---

<sup>11</sup> Beispielsweise fehlerhafte Annahmen (Reibwert, Bremsvermögen), fehlerhafte maschinelle Wahrnehmung und Situationsinterpretation, Eingriffe des Fahrers während eines automatischen Eingriffs und Eingriffe bzw. nicht antizipierte Reaktion des gestoßenen Fahrzeugs.

lich ihrer Auswirkungen für die am Unfall beteiligten Personen bewertbar. Ein Verfahren dafür wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt. In diesem Abschnitt sollen zunächst die grundlegenden Auswirkungen diskutiert werden.

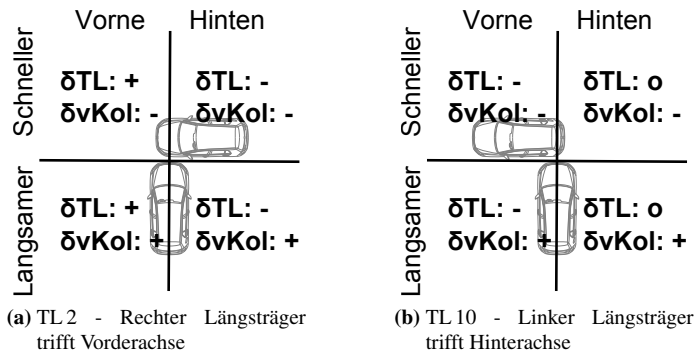
In Abbildung 4.8 sind für die beiden Zieltrefferlagen (TL 2 und TL 10) mögliche Abweichungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Trefferlage angegeben. Deutlich wird, dass sich eine Abweichung in Richtung des Schwerpunktes immer negativ auf die Bewertung auswirkt. Die Bewertung der Geschwindigkeitsabweichung bleibt hingegen für alle Fälle gleich und folgt dem Grundsatz, dass langsamer immer besser ist. Nicht sofort offensichtlich ist der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsabweichung und Trefferlage. Da die Geschwindigkeit die Trefferlage beeinflusst, führt eine langsamere Geschwindigkeit immer zu einer Verschiebung nach hinten und eine schnellere Geschwindigkeit immer zu einer Verschiebung nach vorne. In Abbildung 4.8a ist der linke untere Quadrant damit unwahrscheinlicher, da die niedrigere Geschwindigkeit automatisch eine Verschiebung in den rechten Quadranten bewirkt. Analog ist in Abbildung 4.8b der rechte obere Quadrant unwahrscheinlicher, da eine schnellere Geschwindigkeit zu einer Verschiebung nach links führt.

Im Gegensatz zu TL 2 führen Abweichungen in der hinteren Trefferlage zu größeren Risikoabweichungen. Bedingt durch die Unsicherheiten bezüglich der 3. Sitzreihe<sup>12</sup> ist eine Abweichung weiter weg von der Fahrgastzelle nicht automatisch besser. Problematisch ist, dass die Unsicherheiten gegenüber dem Vorteil der erhöhten Geschwindigkeitsreduktion oder sogar dem einer möglichen Unfallvermeidung gegeneinander abgewogen werden müssen. Dabei stellt sich die Frage, wie man diesen Best-Case (Vermeidung) gegen den unwahrscheinlichen Worst-Case (Insassen in der 3. Sitzreihe) abwägt. Eine mögliche Hierarchie zur Bewertung ist, in absteigender Reihenfolge: (1) Vermeidung, (2) Treffen der TL 10, (3) Geschwindigkeit abbauen. Diese Reihenfolge strukturiert die Rückfallebene des Entscheidungsverfahrens im Fehlerfall<sup>13</sup>. Grundlegend ist dafür eine kontinuierliche Bestimmung der resultierenden Trefferlage während des Eingriffs.

---

<sup>12</sup>Vergleiche Abschnitt 3.1.2.

<sup>13</sup>Vergleiche die 2. Handlungsebene des Flussdiagramms auf Seite 238



**Abbildung 4.8:** Vereinfachte Bewertung der Abweichungen bezüglich der Kollisionsgeschwindigkeit und der Trefferlage ( $\delta vKol$ ,  $\delta TL$ ) für zwei Zieltrefferlagen (TL 2 und TL 10) zur exemplarischen Darstellung. Bewertung: Verbesserung (+), situationsabhängig (o), Verschlechterung (-)

Es muss daher verhindert werden, dass eine Geschwindigkeitsabweichung zu einer Verschiebung der Trefferlage führt bzw. die Veränderung sollte möglichst klein ausfallen (Anforderung 12, vgl. 3.3.2). Damit ergibt sich automatisch ein entsprechender Bias im Entscheidungsverfahren, um einen größeren Handlungsspielraum für Korrekturen des Eingriffs zu erhalten. Der Handlungsspielraum schränkt jedoch entweder die Effizienz ein oder wird durch eine frühere Auslösung zulasten der Kundenakzeptanz erkaufte. Der Bias muss in Abhängigkeit der ursprünglichen Trefferlage zum Schwerpunkt des Gestobenen entsprechend in Richtung schneller oder langsamer ausfallen. Wenn die Trefferlage kontinuierlich bestimmt wird, kann mit sinkender TTC der Bias entsprechend reduziert werden (Anforderung 15, vgl. 3.4.3).

## 4.2 Eingriffsentscheidung

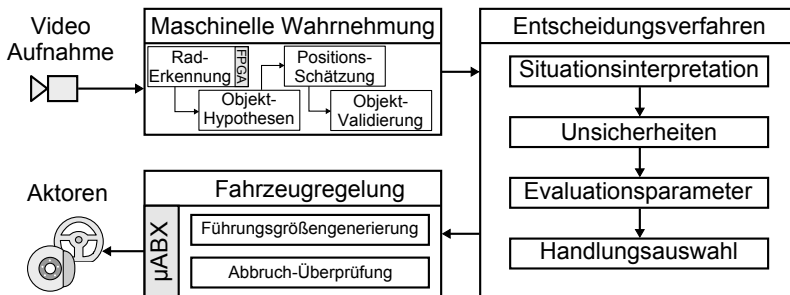
Zur Umsetzung der im Handlungsablauf beschriebenen Schritte wird in diesem Abschnitt ein Entscheidungsverfahren vorgestellt. Im Gegensatz zu Ver-

fahren, die eine Kritikalität anhand der Zeitlücke beschreiben, wird im hier vorgestellten Verfahren die Kritikalität über einen Evaluationsparameter (EP) ausgedrückt. Der Evaluationsparameter kann beliebige Auswirkungen einer Kollision zusammenfassend als skalaren Wert darstellen, beispielsweise die medizinische Unfallschwere einer Kollision. Ordnet man jeder Handlung eine Menge von möglichen Auswirkungen zu und beschreibt diese über den Evaluationsparameter, erhält man eine Bewertung der Handlungen. Anhand dieser Bewertung werden die Auswirkungen von Handlungen einerseits beschreibbar und andererseits miteinander vergleichbar. Neben den automatischen Eingriffen können aber auch Fahrer- und Umfeldhandlungen bewertet werden. Anhand der Bewertungen kann der Situationsverlauf mit und ohne Eingriff verglichen werden. Neben der absoluten Auswirkung einer Handlung kann auch die durch einen Systemeingriff entstehende Differenz bewertet werden. Ebenso können die Auswirkungen von Fehlhandlungen bewertet werden. Damit werden fehlerhafte und fehlerfreie Eingriffe vergleichbar. Dies ermöglicht die Definition von Eingriffsschwellen anhand der Auswirkungen einer Situation ohne und mit fehlerhaftem Eingriff.

Weiterhin können Warnungen anhand der aktuell ausgeführten Fahrerhandlung angepasst generiert werden. Reagiert ein Fahrer bereits so, dass durch eine Handlungsänderung nur noch eine kleine Differenz, bezogen auf den Evaluationsparameter, generiert werden kann, können Warnungen beispielsweise unterdrückt werden, um den Fahrer in der Gefahrensituation nicht zusätzlich zu belasten. Gleichwohl können Warnungen in Situationen, die bezüglich ihrer TTC noch unkritisch sind, aber, bezogen auf den Evaluationsparameter, hohe Verletzungsrisiken bergen, früher ausgelöst werden als dies mit TTC basierten Verfahren möglich wäre. 'Gefährliche' Situationen können somit von 'ungefährlichen' Situationen unterschieden werden.

Die praktische Umsetzung dieses situativen Entscheidungsverfahrens wurde mit dem modularen FAS-Baukasten der Volkswagenforschung umgesetzt. Dabei wurden nur die benötigten Module miteinander verbunden, so dass kein vollständiges Zusammenspiel, wie es in heutigen Serienfahrzeugen eingesetzt wird, implementiert wurde. Das generelle Konzept kann damit auf verschiedene Architekturen übertragen werden. Exemplarisch und zur Erleichterung einer Einordnung wird in Abbildung 4.9 eine Systembeschreibung der funktionalen Architektur gegeben. Im Videostrom eines Kamerasensors werden

querende Fahrzeuge anhand ihrer Felgen/Reifen erkannt. Diese werden als Objekte mit entsprechenden Richtungsvektoren an die Funktion zur Unfallfolgenminderung übergeben. Diese Objekte sind der einzige Bestandteil der maschinell wahrgenommenen Verkehrsszene und werden im Zusammenhang mit der eigenen Position und dem eigenen Richtungsvektor in Bezug gesetzt. Die resultierende Situationsrepräsentation ist Ausgangsbasis für die folgenden Berechnungen und wird in Abschnitt 4.2.1 näher beschrieben. Für die aktuelle Situation werden die bestehenden Handlungsräume berechnet und an den eigentlichen Entscheider übergeben. Hier findet zunächst die Berechnung der Evaluationsparameter statt, in die entsprechende Unsicherheitsbetrachtungen zum Reibwert, Umfeldhandlungen und Fehler bei der maschinellen Wahrnehmung mit einfließen. Nach einer Handlungsauswahl wird diese in Form einer Beschleunigungsanforderung an eine Zwischenschicht zur Fahrzeugregelung übergeben. Diese Schicht zwischen Funktion und Aktorregelung dient als Steuerung und generiert aus den Beschleunigungsanforderungen entsprechende Vorgaben für die jeweiligen Brems- und Lenkregler. Gleichzeitig dient sie als Sicherungsschicht, die eine Zustandsüberwachung ermöglicht, aber auch Abbruchkriterien in Form von Fahrervorgaben direkt umsetzt.



**Abbildung 4.9:** Systembeschreibung der funktionalen Architektur nach Heck et al. (2013)

### 4.2.1 Situationsrepräsentation

Für die maschinelle Bewertung einer Situation ist zunächst eine maschinelle Darstellung erforderlich. Heck et al. (2012a) stellen eine Situationsrepräsentation vor, die auf einem Kennfeldansatz basiert, der eine möglichst rechenefiziente Vergleichbarkeit einer Vielzahl an Handlungsvariationen ermöglicht. Dafür wird für jedes dynamische und statische Objekt aus dem Umfeld ein Kennfeld erzeugt, das alle Tupel aus Trefferlage und Kollisionsgeschwindigkeit mit diesem Objekt beschreibt. Jede Zelle des Feldes enthält dafür eine Bewertung in Form des berechneten Evaluationsparameters. Abbildung 4.10 zeigt ein beispielhaftes Kennfeld für eine Kollision im Querverkehr. Je nach Objekt und gewünschter Aussage lassen sich zur Berechnung unterschiedliche Berechnungsfunktionen verwenden. Im Folgenden wird beispielhaft immer das Verletzungsrisiko der Insassen des gestoßenen Fahrzeugs in der 1. und 2. Sitzreihe aus Abbildung 3.9 verwendet.

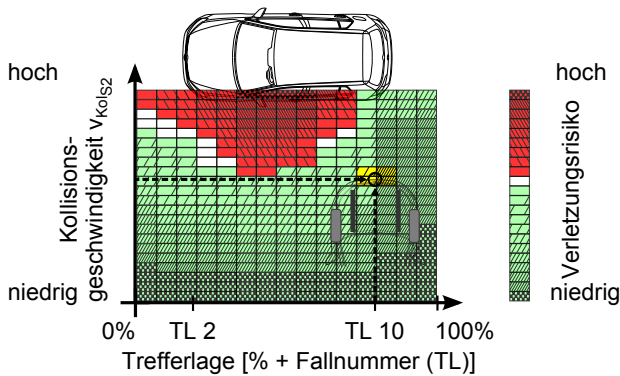
Das Kennfeld ist in seiner Größe skalierbar. Durch die Veränderung der Auflösung ändert sich die Granularität, mit der sich die Situationsentwicklungen beschreiben lassen. Die gleiche Vereinfachung erhält man, indem man Zellen bei der Handlungsauswertung mathematisch zusammenfasst und beispielsweise den Durchschnitt über die Nachbarzellen bildet. Zur Anpassung der Kennfelder an unterschiedliche Fahrzeuge können diese skaliert oder in ihrer Zellenanzahl erweitert werden.

Für einen Kollisionszeitpunkt und unter der Annahme, dass sich alle Objekte mit konstanter Beschleunigung bewegen, ergibt sich damit eine Zelle aus dem Kennfeld, die die Auswirkungen ohne einen Eingriff beschreibt. Durch die Unsicherheiten der maschinellen Wahrnehmung und möglicher Gegnerhandlungen (Beschleunigungsänderungen) kann diese Zelle um eine Menge von Zellen erweitert werden, die alternative Situationsentwicklungen beschreiben.<sup>14</sup>

Es ist auch möglich mehrere Objekte in einem, damit auch notwendigerweise größeren, Kennfeld zu beschreiben. Zur Situationsbewertung muss das Kennfeld dann mit einem Verfahren zur Aufenthaltsprognose kombiniert wer-

---

<sup>14</sup>Zum Einfluss der Steuergrößen vergleiche auch Abschnitt 4.1.2 bzw. die Behandlung der Unsicherheiten in Abschnitt 4.2.3.



**Abbildung 4.10:** Beispielhaftes Verletzungsrisikokennfeld für eine Querverkehrskollision nach Heck et al. (2014a;b). Die Kollisionsgeschwindigkeit ( $v_{Kols_2}$ ) ist auf der Ordinate abgebildet. Die Trefferlage (TL) ist von 0 % bis 100 % auf der Abszisse dargestellt. Für ein Tupel ( $v_{Kols_2}$ , TL) ergibt sich eine Zelle, die das Verletzungsrisiko beschreibt. Dargestellt ist eine Kollision mit mittlerer Kollisionsgeschwindigkeit und TL 10. Deutlich wird das Problem eine geeignete Diskretisierung zu finden. Gelb hervorgehoben sind vier Zellen, die ausgelesen werden, wenn über ein Verfahren extrahiert wird, das alle Zellen mit einem bestimmten Abstand zum Tupel ( $v_{Kols_2}$ , TL) liefert.

den.<sup>15</sup> Für das hier vorgestellte Verfahren werden nur Situationen zur Unfallfolgenminderung mit einem Objekt evaluiert. Daher sind auch alle Darstellungen auf ein Zielobjekt begrenzt.

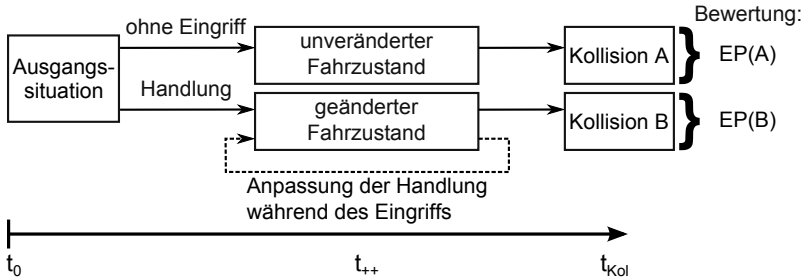
## 4.2.2 Handlungsrepräsentation

Der Handlungsraum beschreibt die Möglichkeiten für einen automatischen Eingriff. Die dafür betrachteten Einschränkungen und Voraussetzungen wurden in Abschnitt 5.1.1 definiert. Durch eine Handlung ergibt sich eine Änderung des Fahrzeugzustandes und dadurch eine räumliche und zeitliche Veränderung der Fahrzeugposition. Diese Veränderung soll zu einer positiven Ver-

<sup>15</sup>Beispielsweise das Verfahren von Herrmann (2013, Abschnitt 4.2).



schiebung des Evaluationsparameters beitragen. Eine Handlung hat daher das Ziel die Bewertung der resultierenden Kollision zu verbessern. Auch das Unterlassen eines Eingriffs kann in diesem Sinne als Handlung verstanden werden. Abbildung 4.11 beschreibt anhand eines Zeitstrahls den Unterschied der Situationsentwicklung mit und ohne Eingriff.



**Abbildung 4.11:** Prinzipieller Verlauf einer Situation mit und ohne Eingriff. Kommt es zu einem Eingriff, verändert die Handlung die resultierende Kollision durch eine Änderung des Fahrzeugzustandes. Die Bewertung der Kollision wird nicht zum Zeitpunkt  $t_{Kol}$  oder danach, sondern schon vorher kontinuierlich durchgeführt.

Zur Speicherung und schnelleren Berechnung der erreichbaren Zellen (z.B. in Abbildung 4.10) werden diese in einer Reihe eigener Kennfelder gespeichert. Jedes Kennfeld beschreibt die mögliche Änderung, ausgehend von einem bestimmten Fahrzeugzustand. Anhand der Kennfelder kann für jeden Fahrzeugzustand situativ berechnet werden, welche Zustandsänderungen möglich sind und welche Beschleunigungen dafür benötigt werden.

### 4.2.3 Entscheidungsverfahren

Das Entscheidungsverfahren verbindet die Kennfelder zur Situationsrepräsentation und Handlungsrepräsentation miteinander. Das Ziel ist eine Handlung auszuwählen, die die Unfallschwere mindert und sicherstellt, dass durch vorhandene Unsicherheiten keine Verschlechterung der Situation auftritt. Unsicherheiten bezüglich des Reibwerts, möglicher Umfeldhandlungen und Fehler bei der maschinellen Wahrnehmung können einzeln bewertet werden.

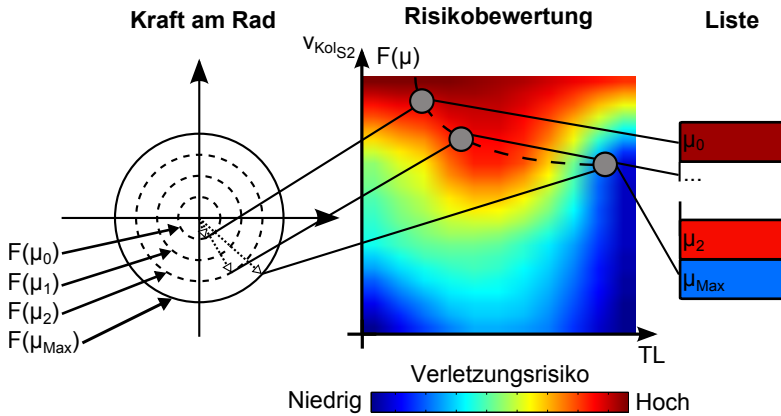
Es ist daher möglich über Schwellwerte im Entscheidungsverfahren die drei Parameter zu applizieren, um sie an die jeweilige Funktion anzupassen. In Abschnitt 4.2.3 wird am Beispiel der Unsicherheiten bezüglich des Reibwerts vorgestellt, wie sich Unsicherheiten auswirken und wie diese berücksichtigt werden. Basierend auf einem Verfahren zur Bestimmung des Evaluationsparameters für einzelne Handlungen wird in Abschnitt 4.2.3 gezeigt, wie die Auswahl zwischen Warnung, Bremsung und Lenkung erfolgt. Die umgesetzten Abbruchkriterien, um eine Übersteuerung durch den Fahrer zu gewährleisten, sind in Abschnitt 4.2.3 aufgezählt.

### **Unsicherheiten im Umfeld**

Unsicherheiten spielen bei der Eingriffsentscheidung in jedem Fahrerassistenzsystem eine Rolle. Der Vorteil des hier vorgestellten Verfahrens ist, dass die zur Absicherung gegen mögliche Unsicherheiten getroffenen Maßnahmen bewertet werden können. Die Bewertung erfolgt indem algorithmisch alle resultierenden Situationen bestimmt werden. Durch den Vergleich der Evaluationsparameter der im Worst-Case erreichbaren Situationen kann eine Abwägung zwischen den verschiedenen Eingriffen erfolgen.

Abbildung 4.12 zeigt ein Verfahren, das vor einem Eingriff alle resultierenden Trefferlagen einer Handlung berechnet, wenn der Reibwert geringer ist als angenommen. Es erstellt eine Liste mit Bewertungen aller erreichbaren Kollisionen. Damit kann abgewogen werden, welche Risiken durch eine Handlung entstehen können, wenn sich die Annahmen bezüglich des Reibwerts als fehlerhaft herausstellen.

Ein weiteres Verfahren zur Modellierung von Unsicherheiten beschreibt Bellin (2011a, Abschnitt 5.2). Im Gegensatz zur Bestimmung aller resultierenden Situationen werden dafür die Risikokennfelder situativ über Sensormodelle angepasst. Ziel ist es, Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Position der gegnerischen Fahrzeuge durch die maschinelle Wahrnehmung direkt zu bewerten. Dadurch können Eigenschaften wie Präzision und Richtigkeit der Wahrnehmung direkt im Kennfeld abgebildet werden. Dafür werden bestimmte Zellbereiche des Kennfelds vergrößert oder verkleinert, um die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der tatsächlichen Objekte in den Bereichen entsprechend zu vergrößern. Mögliche Gegnerhandlungen können eben-



**Abbildung 4.12:** Verfahren zur Erstellung einer Risikobewertung für eine Handlung bei unterschiedlichen Reibwerten nach Heck et al. (2012a). Für eine geplante Handlung ist eine bestimmte Kraftübertragung  $F$  am Rad notwendig, die wiederum einen entsprechend hohen Reibwert voraussetzt  $\mu_{Max}$ . Wird über die Aktoren versucht diese Kraft zu erzeugen, resultieren bei geringeren Reibwerten geringere Kräfte, die links im Kamm'schen Kreis aufgetragen sind. Reduziert man den Reibwert schrittweise, ergibt sich eine Reihe an Kräften  $F(\mu_2)$  bis  $F(\mu_0)$ , die hinsichtlich ihrer Fahrzustände bewertet werden können (mittig). Für jeden evaluierten Reibwert werden die Bewertungen in einer Liste (rechts) gespeichert, die alle möglichen Auswirkungen der Handlungen hinsichtlich der Reibwertunsicherheiten beschreibt.

so modelliert werden, indem man den Objekten Beschleunigungswahrscheinlichkeiten zuordnet und damit ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeiten ändert.

Nachteilig bei diesem Ansatz ist, dass je mehr Unsicherheiten im Kennfeld modelliert werden, die Bewertungsfunktionen für wachsende Bereiche schlechtere Bewertungen ausgeben, da die im Kennfeld modellierten Risiken in Summe steigen. Es ist daher besser zur Bewertung der gegnerischen Handlung auch einen Ansatz zur Bewertung über Evaluationsparameter zu wählen. Dabei wird für die gegnerische Handlung anstelle einer Kennfeldanpassung eine Liste möglicher Aufenthaltspunkte der Fahrzeuge im Umfeld erstellt. Analog zum Reibwert können über Fahrzeugmodelle die möglichen Situa-

tionen einzeln berechnet werden. Anstatt also einen 'pessimistischen' Bias in das Kennfeld zu bringen, können gezielt Varianten über den Vergleich solcher Evaluationsparameter bewertet werden, die durch entsprechende gegnerische Handlungen erreicht werden können.

### Kritikalitätsbestimmung

Zur Bestimmung der Kritikalität einer Situation sind in Abschnitt 2.3 verschiedene Ansätze präsentiert worden. Im hier vorgestellten Verfahren werden die Möglichkeiten zur Situationsbewertung hinsichtlich der Verletzungsriskien nur auf ein Objekt angewendet. Dafür wird in der Situationsinterpretation das querende Objekt ausgewählt, für das die größte Beschleunigungsänderung benötigt wird, um eine Kollision zu vermeiden. Dieser Schritt kann durch ein beliebiges Verfahren ersetzt werden und beeinflusst die folgende Bewertung daher nicht.<sup>16</sup>

Zur Bestimmung der Kritikalität wird der Evaluationsparameter (EP) für jede Handlung berechnet. Dafür werden die zuvor gebildeten Listen (n Elemente) mit Bewertungen der Handlungen ausgewertet, um eine Erfolgswahrscheinlichkeit zu bestimmen, so dass eine bestimmte Verletzung vermieden werden kann. EP ist daher die Wahrscheinlichkeit, dass keine schwere Verletzung ( $P_{Verletzung}$ ) eintritt, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit die Fahrzustandsänderung bezogen auf den Reibwert zu erreichen. Dafür muss sich mindestens ein Reibwert einstellen, der zwischen dem theoretischen Maximum und dem für das Listenelement n benötigten  $\mu_n$  liegt.

$$EP = (1 - P_{Verletzung}) \cdot \int_{\mu_n}^{\mu_{Maximum}} p_{\mu} d\mu$$

Jedes Element der Liste enthält (unter anderem) eine Wahrscheinlichkeit  $p_{\mu(n)}$ , dass genau der benötigte Reibwert  $\mu(n) = \mu_n$  vorhanden ist und eine Verletzungswahrscheinlichkeit  $p_{Verletzung(n)}$  für die resultierende Unfallkonstellation. Damit lässt sich die Durchführungswahrscheinlichkeit einer Handlung, die einen anderen Reibwert, beispielsweise  $\mu_{n1}$  erfordert, bezogen auf

---

<sup>16</sup>Die Bestimmung der Grenzwerte für Beschleunigungen, Zeitlücken und Kennfeldauflösungen etc. findet sich am Beispiel eines Lasersensors in Bellin (2011b, Abschnitt 5.1).

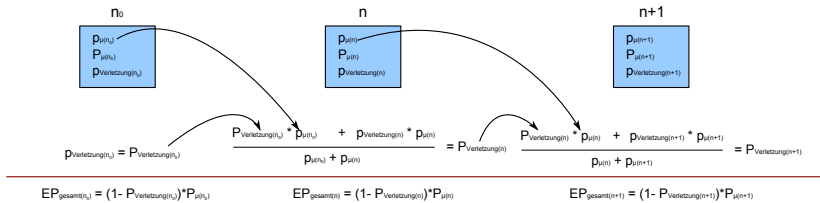
den Reibwert mit:

$$P_{\mu(n_1)} = \frac{P_{\mu(n_1)}}{\sum_{x=1}^{n_1} P_{\mu(x)}}$$

berechnen. Genauso kann auch das Verletzungsrisiko einfach berechnet werden, indem man die Berechnungen der vorherigen Elemente nutzt:

$$P_{Verletzung(n)} = \sum_{x=1}^n \frac{(P_{Verletzung(x)} \cdot P_{\mu(x)}) + (P_{Verletzung(x-1)} \cdot P_{\mu(x-1)})}{P_{\mu(x-1)} + P_{\mu(x)}}$$

Abbildung 4.13 zeigt das Verfahren für drei beispielhafte Elemente, beginnend mit  $n_0$ . Sind die einzelnen Wahrscheinlichkeiten bekannt, kann jeweils der Evaluationsparameter EP als Erfolgswahrscheinlichkeit berechnet werden.



**Abbildung 4.13:** Berechnung der Kritikalität nach Heck et al. (2012a). Dargestellt sind drei Listenelemente ( $n_0$  bis  $n+1$ ), die jeweils eine Kollision beschreiben. Für jedes Element wird ausgehend von einer Verletzungswahrscheinlichkeit  $P_{Verletzung(n)}$  und der Wahrscheinlichkeit, dass der für die Handlung benötigte Reibwert  $p_{\mu(n)}$  vorhanden ist, das Verletzungsrisiko  $P_{Verletzung(n)}$  berechnet. Für jede Kollision kann damit der Evaluationsparameter EP berechnet werden.

## Handlungsauswahl und Auslösekriterien

Das Flussdiagramm auf Seite 238 zeigt den prinzipiellen Ablauf zur Handlungsfindung (Anforderung 24, vgl. 3.6.3). Ist eine Kollisionstrefferlage bei unverändertem Fahrzustand wahrscheinlich, wird eine Risikobewertung aller Handlungen durchgeführt. Dazu werden die beschriebenen Evaluationsparameter aller Handlungen ( $EP_{Handlung}$ ) berechnet. Zusätzlich wird der Evalua-

tionsparameter für den unveränderten Fahrzustand – ohne Systemeingriff – ( $EP_{!Handlung}$ ) bestimmt.

In Abhängigkeit der Situation wird zunächst bestimmt, ob die Trefferlage im Vorderwagen liegt und als Zieltrefferlage TL 2 erreicht werden kann. Wenn TL 2 erreichbar ist und das Verletzungsrisiko mit Eingriff geringer als ohne Eingriff ist ( $EP_{Handlung} \geq EP_{!Handlung}$ ), wird eine Zielbremsung auf TL 2 ausgelöst, die laufend auf Erreichbarkeit überprüft wird. Ist TL 2 nicht mehr erreichbar und noch keine Kollision erfolgt, springt die Handlungsauswahl in die 2. Handlungsebene (s.u.).

Liegt die ursprüngliche Trefferlage nicht im Bereich des Vorderwagens wird überprüft, ob TL 10 durch Bremsen bzw. durch kombiniertes Bremsen und Lenken erreichbar ist. Für beide Fälle wird jeweils geprüft, ob das Verletzungsrisiko mit Eingriff geringer als ohne Eingriff ist ( $EP_{Handlung} \geq EP_{!Handlung}$ ). Senkt ein Eingriff das Verletzungsrisiko wird eine Zielbremsung durchgeführt. Analog zum Eingriff bei TL 2 wird diese laufend überprüft, angepasst und bei erfolgter Kollision beendet. Ist TL 10 nicht mehr erreichbar, springt das Verfahren in die 2. Handlungsebene.

Die 2. Handlungsebene dient der Begrenzung der Unfallschwere, wenn ein Eingriff zur Trefferlagenänderung ausgeführt wurde, die Zieltrefferlage aber nicht mehr erreicht werden kann. Die 2. Ebene bildet damit die Rückfallebene, falls Annahmen oder Handlungen des gestoßenen Fahrzeugs einen erfolgreichen Eingriff unmöglich gemacht haben. Es ist nicht das Ziel der 2. Ebene eine Legitimation für andere Eingriffsformen als die gezielte Bremsung auf TL 2 oder TL 10 zu geben. Sie sollte vielmehr als Schadensbegrenzung im Fehlerfall verstanden werden, daher wird auch keine weitere explizite Prüfung zur Handlungsunterlassung ( $EP_{!Handlung}$ ) durchgeführt.

Der obere Zweig der 2. Handlungsebene deckt die Fälle ab, bei denen eine Zieltrefferlage TL 2 nicht erreicht werden konnte. Dabei wird die Bremsung entweder verstärkt oder abgeschwächt, um die Trefferlage weiterhin im Vorderwagen zu halten. Ist ein sicheres Erreichen der TL 10 möglich geworden, springt das Verfahren zurück in die 1. Handlungsebene. Für die Fälle, dass der Bereich des Vorderwagens und gleichzeitig TL 10 nicht mehr erreicht werden können, wird die Teilbremsung bis zu einer Vollbremsung verstärkt. Die Vollbremsung ist, wie der untere Zweig der 2. Ebene zeigt, somit die Ultima Ratio

für einen fehlerhaften Eingriff, der sich zu einer Trefferlage im Bereich der Fahrgastzelle entwickelt.

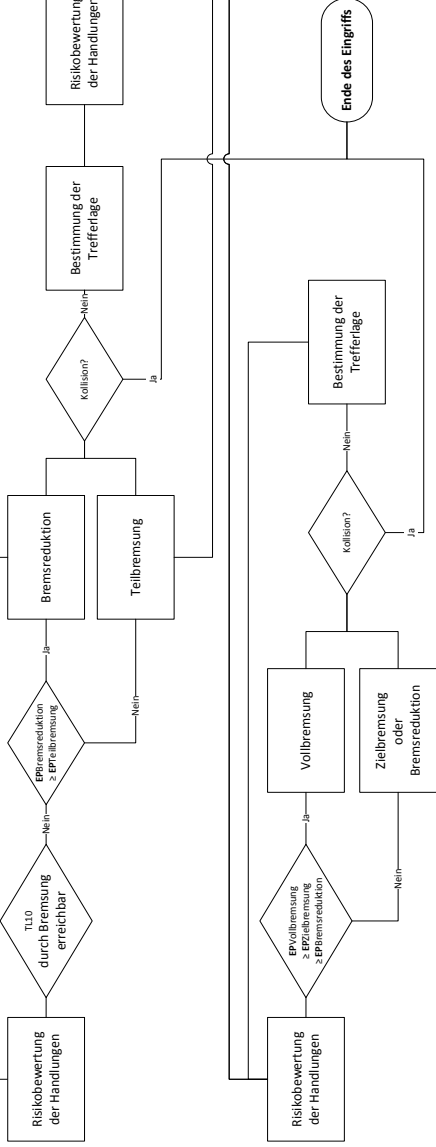
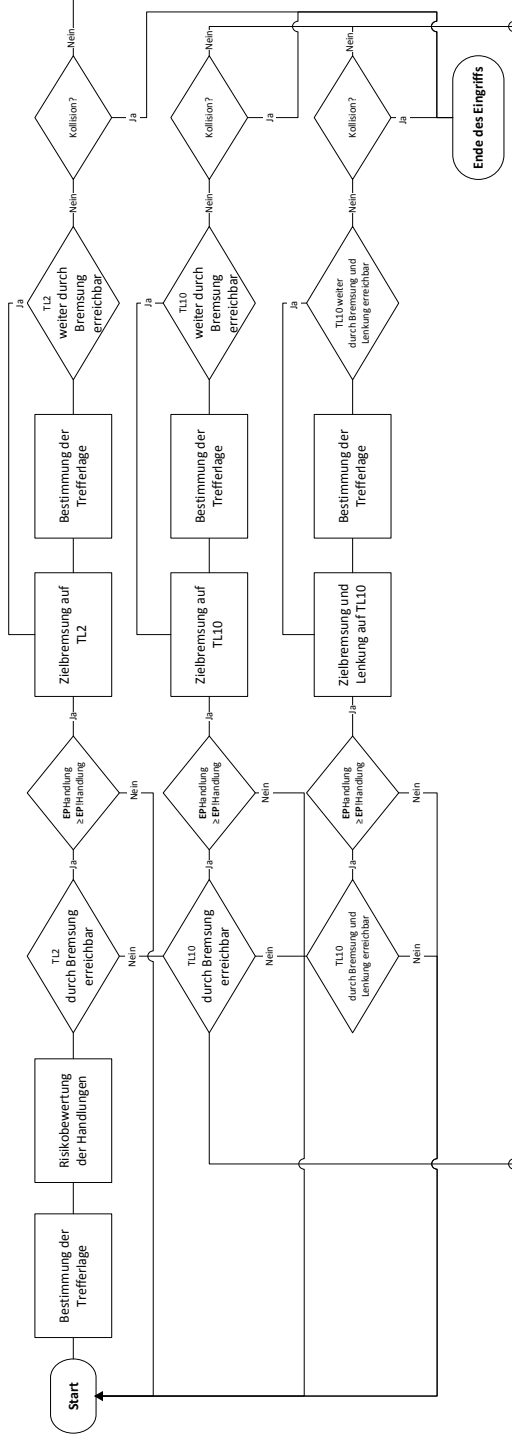
Im Flussdiagramm sind weder externe Abbruchbedingungen noch das vorzeitige Ende eines Eingriffs modelliert. Findet keine Kollision statt und erreicht das Fahrzeug den Stillstand, wird der Eingriff beendet. Aufgrund der prototypischen Natur der verwendeten Forschungssensorik konnte ein Fahrzeug kurz<sup>17</sup> vor der Kollision nicht mehr sicher erkannt werden. Es war daher nicht möglich die Funktion abubrechen, falls eine Kollision vermieden wurde, das Fahrzeug aber nicht bis in den Stillstand gebremst hatte. Die Abbruchüberprüfung der Fahrzeugregelung begrenzt jedoch die maximale Eingriffsdauer auf zwei Sekunden.

---

<sup>17</sup> Ab einem Abstand kleiner als 6 Meter.

# 1. Handlungsebene

Zielfreilege nicht erreicht falls  
Begrenzung der Unfallschwere falls  
Zielfreilege nicht erreicht werden kann





### **Abbruchkriterien**

Neben der zeitlichen Beschränkung auf zwei Sekunden, werden die Reaktionen des Fahrers an den Pedalen und am Lenkrad als Abbruchkriterien definiert (Anforderung 20, vgl. 3.5.4). Dazu muss anhand der Pedalstellung bei Beginn des Eingriffs differenziert werden.

Am Gaspedal werden die Gaspedalwertänderungen ausgewertet. Für Gaspedalwerte kleiner als 10 % reicht eine Änderung um +20 %. Bei Ausgangswerten oberhalb 10 % muss die Änderung entsprechend größer ausfallen und orientiert sich an im Markt befindlichen Seriensystemen. Führt eine Fahrerlenkung zu so großen Querschleunigungen, dass ein ABS Regeleingriff zu erwarten ist, wird eine evtl. ausgeführte Zielbremsung abgeworfen.

Als Abbruchkriterium über die Bremsung wird eine Fahrerbremsung, die 10 % stärker ist als die vom System initiierte Zielbremsung, verwendet. Ein (kombinierter) Lenkeingriff wird abgebrochen, wenn der Fahrer länger als 500 ms das Lenkrad gegenhält. In den beiden letzten Fällen wird jeweils evaluiert, ob eine Vollbremsung zu einer besseren Bewertung über den Evaluationsparameter führt und gegebenenfalls der Bremsdruckaufbau bis zum Maximum unterstützt wird.

Eine Systemüberwachung stellt über Heartbeat-Nachrichten sicher, dass alle Komponenten aus Abbildung 4.9 aktiv sind und regelmäßig Daten verarbeiten und senden. Im Fehlerfall werden Bremsung und Lenkung abgeworfen.

## **Teil III**

### **Umsetzung im praktischen Versuch**

# Kapitel 5

## Experimentelle Verifikation

Dieses Kapitel fasst die experimentellen Ergebnisse zusammen. Die Arbeiten dafür fanden unter anderem im Kontext des EU-Projekts interactIVe statt. Bestimmte Designentscheidungen wurden daher durch die Vorgaben des Subprojekts EMIC mit dem Fokus auf low-cost Unfallvermeidung getroffen. Die Arbeiten an der low-cost Bildverarbeitung zur Erkennung der Fahrgastzelle wurden vor dem Hintergrund begonnen, diese prinzipielle Möglichkeit zu erforschen. Die Überprüfung des Systems im realen Verkehr spielte dabei keine wesentliche Rolle. Zunächst sollte die generelle Machbarkeit gezeigt werden.

Aufgrund der frühen Festlegung im Projekt die finalen Versuche zur Genauigkeit im veHIL durchzuführen, existieren nicht genug vergleichbare Daten, um Aussagen zur erzielten Positionsgenauigkeit zu belegen. Die Versuche konnten jedoch im Rahmen von internen Demonstrationen und beim Abschlussevent des EU Projekts interactIVe durch eine Vielzahl von Fahrern selbst ausprobiert werden. Es handelt sich allerdings auch nur um eine prototypische Umsetzung, die das gezeigte Szenario abdeckt. Der Reifegrad, um die Funktion im realen Verkehr zumindest passiv zu evaluieren, wurde aufgrund der zu hohen Fehlerkennungsrate nicht erreicht.

Auf eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Versuchsträgers für die praktische Erprobung wird in dieser Arbeit verzichtet. Die funktionale Architektur des Fahrzeugs ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die grundlegende Performance der verwendeten Aktorik ist in Abschnitt 5.1.1 beschrieben. Eine Übersicht zum Fahrzeugaufbau und der verwendeten Komponenten findet sich in Sjögren et al. (2012, Kapitel 9). Einen Überblick über das Zusammenspiel der Komponenten, insbesondere für die umgesetzte Querverkehrs-

funktion, stellen Heck et al. (2012b) vor. Die Sensorik und Bildverarbeitung der für die praktischen Versuche verwendeten maschinellen Wahrnehmung ist genauer in Sychrovský et al. (2013a) erklärt.

Zur praktischen Erprobung und Evaluation der erreichten Genauigkeiten sind entwicklungsbegleitend eine Reihe von Versuchen durchgeführt worden (Abschnitt 5.1). Die Erprobung fand erst auf dem Prüfgelände bei Volkswagen statt und hatte zum Ziel Entwicklungstests zur Abstimmung des Gesamtsystems durchzuführen. Eine Gesamtgenauigkeit konnte abschließend im *veHIL* bei TNO<sup>1</sup> ermittelt werden, da hier genaue Positionswerte für das eigene Fahrzeug (Ego) und das querende Objekt (Target) extern gemessen werden können. Diese Versuche sind teilweise im Rahmen des EU-Projekts *interactIVe* durchgeführt worden, ihre Ergebnisse finden sich daher teilweise auch in Fahrenkrog et al. (2013).

Zukünftig dürfte auch das Thema 'Test und Absicherung' eine große Rolle für die Entwicklung dieser Systeme spielen. Die Versuchsdurchführung im Querverkehr ist aufwändiger als im Längsverkehr. Die Trefferlagenänderung führt dabei eine weitere Stufe der Komplexität ein, da jetzt nicht nur der Kontakt mit einem Testobjekt, sondern auch die genaue Trefferlage bestimmt werden muss. Die getesteten Szenarien stellen nur eine kleine Auswahl der möglichen Situationen des realen Verkehrs dar. Die Erweiterung auf den vollen Umfang möglicher Kreuzungsszenarien ist bezogen auf den Versuchsaufbau anspruchsvoll. Sefati et al. (2013) stellen beispielsweise einen Ansatz zur *In-Vehicle-Simulation* vor, um hochdynamische Fahrmanöver abzusichern. Im *veHIL* sind Versuche durchführbar, bei denen das Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand fixiert wird und mit einer Umfeldsimulation verbunden ist. Diese kann dann entsprechende Sensordaten einspielen oder Roboterziele im Erfassungsbereich der Fahrzeugsensoren bewegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden des Weiteren insgesamt drei Simulatorstudien durchgeführt, die in Abschnitt 5.2 vorgestellt werden. Zwei Studien wurden im Rahmen des *interactIVe* Projekts bei Kooperationspartnern durchgeführt und sind daher teilweise auch im Projektrahmen veröffentlicht worden. Die erste Studie fand im statischen Fahrsimulator des DLR statt (Brockmann et al. 2012, Kapitel 6). Ziel war die Untersuchung von Fahrerre-

---

<sup>1</sup>Vergleiche Gietelink et al. (2003) und Bromwell (2011).

aktionen auf Lenkeingriffe in unvermeidbaren Querverkehrssituationen. Die zweite Studie wurde im dynamischen Fahrsimulator der CTAG mit dem Ziel durchgeführt, die Reaktionen der Fahrer auf Gefahrensituationen im Querverkehr mit und ohne System zu vergleichen (Fahrenkrog et al. 2013, Abschnitt A2.3). Die dritte, von interactive unabhängige Studie, wurde intern bei Volkswagen durchgeführt. Dafür wurde der Versuchsträger mit einem Vehicle in the Loop System ausgestattet, um die Fahrerreaktionen bei automatischen Eingriffen zu untersuchen. Im Rahmen der Studien wurden die Probanden anschließend noch zu dem System befragt (Abschnitt 5.2). Die Ergebnisse der Versuche werden im Folgenden genauer vorgestellt.

## **5.1 Das unfallfolgenmindernde System im Realfahrzeug**

Der folgende Abschnitt beschreibt zunächst die Arbeiten zur Umsetzung der Steuerung (Abschnitt 5.1.1). Ziel ist es, schnell eine hohe Verzögerung zu erzeugen und diese im Modell zur Planung der Eingriffe möglichst genau vorherzusagen. Abschnitt 5.1.2 fasst die Ergebnisse der praktischen Erprobung des Gesamtsystems zusammen.

### **5.1.1 Realisierung der Steuerung**

Vor dem Hintergrund eines möglichen Serieneinsatzes im Fahrzeug wurden gezielt echtzeitfähige Ansätze mit geringer Komplexität evaluiert. Brännström et al. (2010) beschreiben einen echtzeitfähigen Algorithmus basierend auf einem Einspurmodell. Neben der Kritikalitätsberechnung erlaubt der Algorithmus das Berechnen von Eingriffszeitpunkten für Ausweichhandlungen basierend auf Lenkung, Bremsung und Beschleunigung bzw. einer Kombination daraus. Brännström et al. (2011) entwickeln daraus gezielt Eingriffszeiten und -größen für automatische Eingriffe zur Unfallvermeidung. Dabei werden neben Kollisionen mit Längsverkehr insbesondere Kollisionen mit kreuzendem Verkehr betrachtet. Sandblom & Brännström (2011) erweitern den Ansatz um eine Fahrermodellierung, die Sicherheitsabstände

berücksichtigt und frühere Eingriffszeitpunkte ermöglicht. Die Modelle werden über feste Parameter auf das jeweilige Fahrzeug angepasst und sind in der Simulation und im Versuch erfolgreich validiert. In der Literatur finden sich zahlreiche ähnliche Ansätze, immer mit dem Ziel Ausweichzeitpunkte und -trajektorien zu berechnen bzw. eine Teil- oder Vollbremsung einzuleiten, wenn ein Ausweichen nicht mehr möglich ist.<sup>2</sup>

Im Hinblick auf die anfänglich vermuteten sehr kurzen Eingriffszeiten wurde in dieser Arbeit ein Ansatz gewählt, der sich auf ein Einspurmodell zurückführen lässt, aber in der Implementierung als rein parametrisiertes Kennfeld vorliegt. Dies hat zum einen den Vorteil bezüglich des Datenmodells gut zu dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Verfahren zur Kritikalitätsberechnung zu passen und ist daher (maschinell) einfach zu berechnen. Zum anderen erlaubt es eine sehr genau anpassbare Modellierung der resultierenden Quer- und Längsbeschleunigung für kurze Aktivierungszeiten der Aktoren.

### Grundlagen

Das hier vorgestellte Verfahren ist auch in Heck et al. (2012a) und den vom Autor betreuten Arbeiten von Bellin (2011a;b) verwendet und beschrieben worden. Eine detaillierte Einführung und Herleitung finden sich in Bellin (2011a, Kapitel 2). Grundlegende Annahme ist, dass der Handlungsraum vor einer Kollision durch die zwischen Reifen und Straße übertragbaren Kräfte begrenzt ist. Die Eigenschaften des Fahrzeugs und des Reifens beschränken das theoretische Maximum. Für einen automatischen Eingriff kann nur umgesetzt werden, was über die Aktuatoren automatisch ausgeführt werden kann. Daher ist der Handlungsspielraum, insbesondere in den ersten 500 ms eines Eingriffs, beschränkt. Gezieltes Beschleunigen wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Eine Handlung ist daher entweder ein Brems- oder Lenkeingriff bzw. die Kombination daraus, die durch folgende Bedingungen definiert wird:

1. Handlungen sollen nicht zu einem Überschreiten des Kraftschlusspotenzials mit der Straße führen. Daher müssen die maximalen Lenk- und Bremskräfte beschränkt werden, um den Reifen nicht aus der Haft- in

---

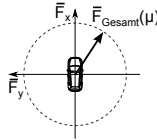
<sup>2</sup>Vergleiche beispielsweise Jansson et al. (2002), Stählin (2008), und Reichel et al. (2010).

die Gleitreibung zu bringen.<sup>3</sup> Das Modell des Kamm'schen Kreises beschreibt zusammen mit dem Einspurmodell die maximal übertragbaren Kräfte. Der Betrag der vektoriellen Addition der Kräfte in X- ( $\vec{F}_x$ ) und Y-Richtung ( $\vec{F}_y$ ) darf das über den Reibkoeffizienten  $\mu$  bestimmte Maximum  $\vec{F}_{Gesamt}(\mu)$  zwischen Straße und Reifen nicht überschreiten.

Unter der Annahme<sup>4</sup>, dass die auftretenden Längs- und Querkräfte nur durch Bremsung und Lenkung entstehen und damit gezielt vom System gesteuert werden können, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$|\vec{F}_x(F_{Brems}) + \vec{F}_y(F_{Lenk})| \leq |\vec{F}_{Gesamt}(\mu)|.$$

Damit ist eine Handlung über den Betrag und die Richtung des Beschleunigungsvektors ausdrückbar, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 5.1:** Beschleunigungsvektor der Handlung (Heck et al. 2012a)

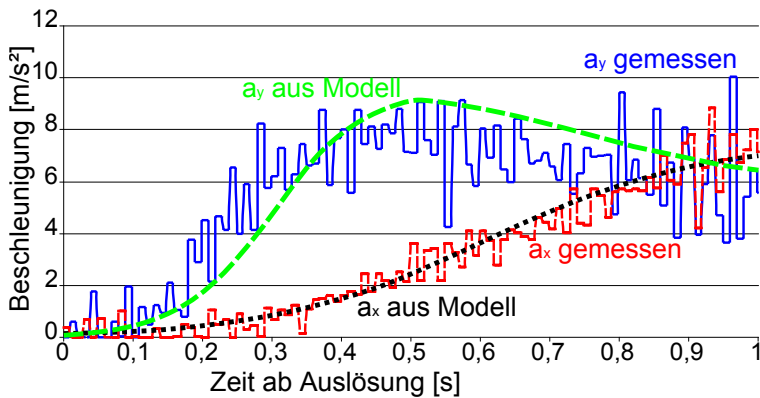
2. Neben der absoluten fahrphysikalischen Beschränkung durch den Reibwert hat die zeitliche Änderung des Beschleunigungsvektors ebenfalls ein Maximum, das nicht überschritten werden kann. Dies ergibt sich durch die Massenträgheit, das Fahrwerk (Federung und Dämpfung) und die Stellgeschwindigkeit der Aktuatorik. Daher gelten die zeitlichen Beziehungen:

$$|\vec{F}_{Brems}(t)| \leq |\vec{F}_{Brems\_max}(t)|,$$

$$|\vec{F}_{Lenk}(t)| \leq |\vec{F}_{Lenk\_max}(t)|.$$

<sup>3</sup>Der Übergang zwischen Gleit- und Haftreibung erfolgt vom Prinzip her fließend. Verliert das Fahrzeug die Haftung, ist die Fahrzeugtrajektorie nicht mehr steuerbar. Zudem werden die übertragbaren Kräfte reduziert.

<sup>4</sup>Vergleiche Bellin (2011a, Abschnitt 2.3) für eine ausführliche Herleitung.



**Abbildung 5.2:** Beschleunigungsverlauf bei Vollbremsung und gleichzeitiger voller Lenkanforderung als Messung und im Modell (Bellin 2011a). Die schneller ansteigende Querbeschleunigung nimmt bei Erreichen der maximalen Gesamtbeschleunigung wieder leicht ab, bis sich ein Gleichgewicht in X- und Y-Richtung einstellt, das ab 0,8 s durch die ABS-Regeleingriffe in der Messung anfängt zu schwingen.

In Abbildung 5.2 ist der gemessene Verlauf der Beschleunigung in X- und Y-Richtung bei einer Vollbremsung und gleichzeitiger voller Lenkung dargestellt sowie dessen Abbildung des zeitlichen Verlaufs im Modell. Damit erhält der statische Beschleunigungsvektor sozusagen eine zeitliche Komponente, die seine Veränderung limitiert.

Alle Handlungen, die die beiden Bedingungen erfüllen, also weder eine maximale Gesamtbeschleunigung noch eine maximale Beschleunigungsänderung übersteigen, sind für einen automatischen Eingriff möglich. Um diese Handlungen auf den aktuellen Fahrzustand abzubilden und damit die resultierende Fahrzustandsänderung bzw. den resultierenden Fahrzustand zu berechnen, wird ein einfaches Einspurmodell verwendet. Problematisch bei der Verwendung des Einspurmodells sind, aufgrund des nichtlinearen Reifenverhaltens und der Radlaständerungen, Beschleunigungen an den Grenzen der Fahrstabilität. Prinzipiell kann man es daher nur in einer begrenzten Anzahl an Fahr-situationen anwenden. Da das Einspurmodell nur verwendet wird, um für kurze Eingriffszeiten die Position relativ zu anderen Fahrzeugen zu berechnen,



können für die kleinen Änderungen des Gierwinkels  $\Psi$  geeignete Korrektur- bzw. Linearisierungsfaktoren  $c_{GW}$  aus den Kennfeldern der Handlung abgeleitet werden:

$$\Psi = c_{GW} * \int a_y dt + \Psi_0.$$

Setzt man den Korrekturfaktor in die allgemeinen Gleichungen zur Ortsbestimmung ein, erhält man:

$$x = \int \left( \int a_x dt \cdot \cos(c_{GW} \cdot \int a_y dt + \Psi_0) - \int a_y dt \cdot \sin(c_{GW} \cdot \int a_y dt + \Psi_0) + \dot{x} \right) dt$$

und

$$y = \int \left( \int a_y dt \cdot \cos(c_{GW} \cdot \int a_y dt + \Psi_0) - \int a_x dt \cdot \sin(c_{GW} \cdot \int a_y dt + \Psi_0) + \dot{y} \right) dt$$

und damit jeweils die Vereinfachung:

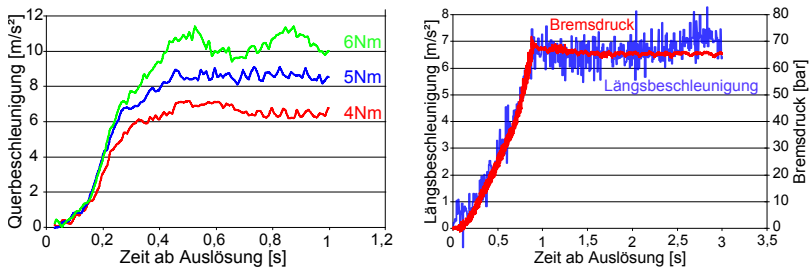
$$x = \iint a_x dt dt$$

$$y = \iint a_y dt dt.$$

Damit kann, ausgehend von der relativen Position zu einem beliebigen Objekt, für eine beliebige Handlung die Position für einen zu wählenden Zeitpunkt berechnet werden. Für den Fall, dass die gewählte Handlung einen größeren Reibwert voraussetzt als verfügbar, wird die berechnete Position nicht erreicht. Diese Abweichung wird vor der Auslösung über das in Abschnitt 4.2.3 vorgestellte Verfahren berücksichtigt. Dafür werden für die angeforderte Beschleunigung alle Fälle mit reduziertem Reibwert durchgerechnet

und die jeweilige Endposition bezüglich der zu erwartenden Unfallschwere bewertet. Nur Handlungen, bei denen alle Fälle zu einer Verringerung oder zumindest nicht zu einer Verschlechterung der zu erwartenden Verletzungsschwere (für alle am Unfall Beteiligten) führen, werden ausgeführt.

### Umsetzung und erreichte Genauigkeiten



(a) Angefordertes Lenkmoment 4, 5 oder 6 Nm, um  $1150^\circ/\text{s}$  Lenkwinkeländerung zu erzeugen

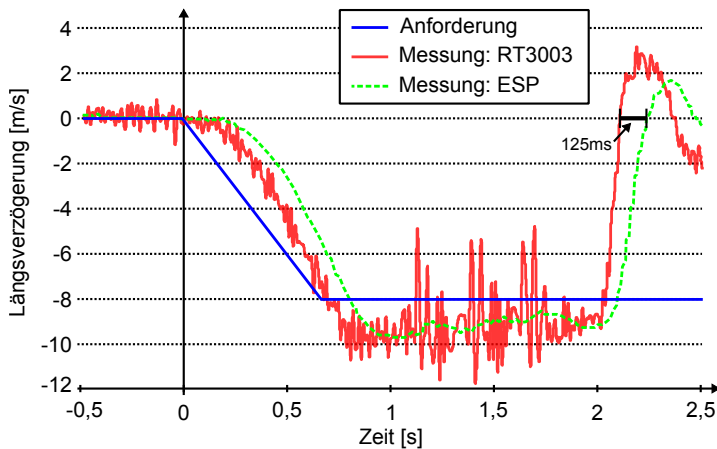
(b) Angeforderter Bremsdruck 65 bar

**Abbildung 5.3:** Verlauf der Quer- und Längsbeschleunigungen in Abhängigkeit des Lenkmoments bzw. des Bremsdrucks im praktischen Versuch nach Bellin (2011a, Abschnitt 2.3)

Abbildung 5.3 zeigt den Verlauf der realisierbaren Quer- und Längsbeschleunigungen im verwendeten Versuchsträger.<sup>5</sup> Deutlich ist, dass sich die Querbeschleunigung in Abbildung 5.3a schneller aufbaut als die Längsbe-

<sup>5</sup>Bei dem Fahrzeug handelt es sich um einen Volkswagen Golf VI GTI, bei dem das ESP Aggregat und die Lenkung gegen die vom Volkswagen Passat B7 getauscht wurden, um diese besser ansteuern zu können. Zusätzlich kann ein Bremsbooster aus dem Audi Q7 genutzt werden, um die Anstiegszeiten des Bremsdrucks zu erhöhen und somit zukünftige leistungsfähigere Bremssysteme zu simulieren. Prinzipiell handelt es sich damit um in der Serie verfügbare Technik. Daher werden die hier angegeben Werte als repräsentativ für Fahrzeuge aus dem Oberklassesegment angesehen.

schleunigung durch die Serienbremse ohne Booster.<sup>6</sup> Erst mit Verwendung des Bremsboosters kann ein Vollbremsdruck innerhalb von ca. 600 ms erreicht werden (Abbildung 5.5a). Zum Vergleich ist der Druckverlauf bei manueller Betätigung durch den Fahrer in Tabelle 5.1 dargestellt. Neben der Bestimmung der Verläufe zur Parametrierung der Kennfelder ist es wichtig, wie genau diese bei einem automatischen Eingriff abgefahren werden können und welche Positionsgenauigkeit damit erreicht werden kann. Dies soll exemplarisch am Verlauf der Bremsverzögerung diskutiert werden.



**Abbildung 5.4:** Vergleich der gemessenen Verzögerung zwischen Referenz- und Seriensensorik.

Die Verzögerung durch die Bremse ist abhängig vom Bremsdruck aller vier Räder. Der Bremsdruck wird entweder über die ESP Pumpe oder den Bremsbooster in Kombination mit der ESP-Pumpe aufgebaut. ABS Regeleingriffe reduzieren den Druck pro Rad individuell, der direkt nach einem

<sup>6</sup>Als Referenzsensorik wurde zur Messung eine RT 3003 von Oxford Technical verwendet. Dieser Sensor verbindet differenzielles GPS/GLOSNASS mit einer Inertialsensorik zur Beschleunigungsmessung. Die Genauigkeit der Positions-Referenzmessung wird dafür vom Hersteller mit 20 mm angegeben.

ABS-Eingriff wieder aufgebaut wird. Der Ist-Wert des Bremsdrucks bestimmt damit maßgeblich die Verzögerung. Die Verzögerung kann anhand der Beschleunigungssensoren im ESP gemessen werden. Wie Abbildung 5.4 zeigt, ist die Messung der Seriensensorik stark geglättet, läuft dem Verlauf der Referenzverzögerung mindestens 100 ms hinterher und weicht zudem von der am ESP Gerät angeforderten Fahrzeugverzögerung ab. Anstatt die Verzögerung nur über die gemessene Verzögerung zu regeln, wurden daher Kennfelder ermittelt, die für bestimmte Bremsdruckanforderungen die resultierende Verzögerung angeben. Dies birgt den Nachteil, dass die resultierenden Verzögerungen von einer Vielzahl von Faktoren<sup>7</sup> abhängig sind. Im Zuge der fortschreitenden Automatisierung von Fahrfunktionen ist davon auszugehen, dass die verwendeten Sensordaten zunehmend in besserer Güte vorliegen und ein allgemeingültiger Ansatz gewählt werden kann.

Abbildung 5.5a zeigt den Verzögerungsverlauf des verwendeten Reglers<sup>8</sup> bei unterschiedlichen Verzögerungsanforderungen.<sup>9</sup> Die Soll-Verzögerung wird dabei nicht über die gemessene Verzögerung, sondern anhand des Bremsdrucks und eines zugehörigen Kennfeldes mit resultierenden Verzögerungen bestimmt. Diese Verzögerungskurven werden auch zur Ermittlung der Korrekturkonstanten  $c_{GW}$  genutzt.<sup>10</sup> Abbildung 5.5b zeigt die dafür angeforderten Bremsdrücke. Im Falle der nicht realisierbaren  $-12 \text{ m/s}^2$  greift das ABS bei Erreichen des Kraftschlusspotenzials ein, bis das Fahrzeug steht. Ohne Bremsbooster sind die Gradienten entsprechend flacher. Zum Vergleich sind die beschreibenden Kenndaten für den Druck- und Verzögerungsaufbau mit und ohne Bremsbooster in Tabelle 5.1 dargestellt.

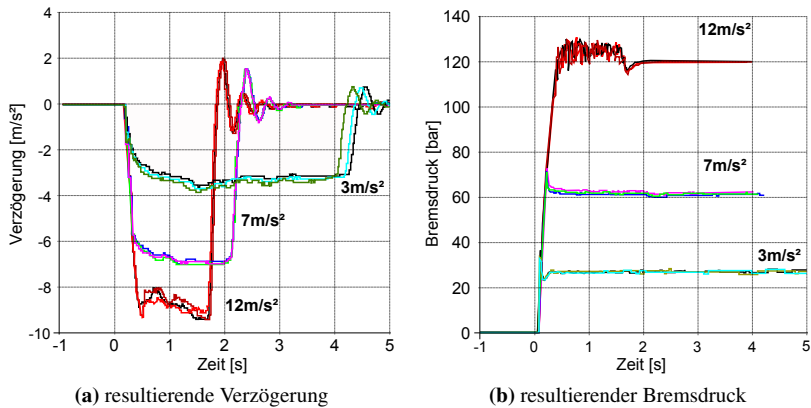
---

<sup>7</sup>Zu den Faktoren gehören: Fahrzeug, Reifen, Straßenzustand, Temperatur, Dämpfer, Beladung etc.. In der Praxis, während der Entwicklungsphase, hat sich für unser Fahrzeug gezeigt, dass einmal parametrisiert sowohl leichter Regen, Temperaturänderungen wie auch wechselnder Beladungszustand nur geringe Abweichungen (innerhalb der auch bei idealen Bedingungen vorhandenen Toleranzen) verursachen.

<sup>8</sup>Der Regler ist eine Entwicklung von Omar El-Mikati und Teil des angesprochenen Volkswagen FAS-Baukastens.

<sup>9</sup>Verwendet wurden Bremsbooster und ESP in Kombination.

<sup>10</sup>Auffällig ist, dass der Gradient des Druckanstiegs abhängig von der Anforderungshöhe ist. Dieser Effekt liegt nicht am verwendeten Regler, sondern an der benutzten Hardware und der Art, wie diese den angeforderten Bremsdruck einregelt.

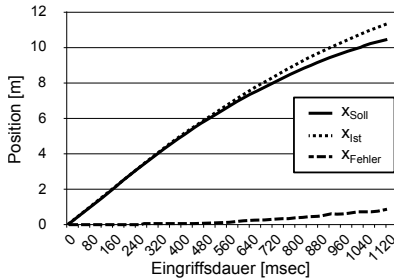


**Abbildung 5.5:** Gemessene Fahrzeugverzögerung und gemessener Bremsdruck für unterschiedliche Verzögerungsanforderungen ( $3, 7$  und  $12 \text{ m/s}^2$ ). Ausgelöst bei  $50 \text{ km/h}$  bis in den Stand mit je drei Wiederholungen

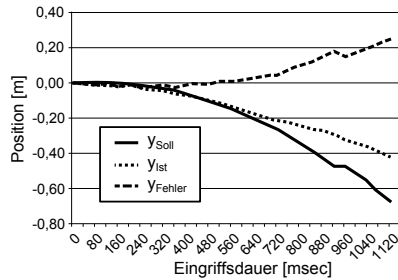
Sind die Verzögerungsgradienten bekannt, können Versuche zur Positionsgenauigkeit<sup>11</sup> des Gesamtfahrzeugs durchgeführt werden. Dafür werden im Folgenden zwei Beispiele vorgestellt, die das Systemverhalten im Grenzbereich zeigen. Erfolgreiche Eingriffe und die resultierenden Genauigkeiten innerhalb der Systemgrenzen werden in Abschnitt 5.1 vorgestellt.

Abbildung 5.6a zeigt exemplarisch die tatsächlich zurückgelegte Strecke für eine kombinierte Brems-/Lenkanforderung ohne Nachregelung. Bis zum Aufbau der Vollverzögerung sollte ein zusätzlicher Versatz durch Lenkung aufgebaut werden. Abbildung 5.6b zeigt den dabei resultierenden Geschwindigkeitsverlauf in longitudinaler Richtung. Bedingt durch Mess- und Prädiktionsfehler können die gemessenen Werte ca. einen halben Zeitschritt (20 ms) hinterherhängen. Ab 400 ms wird jedoch der Effekt des ersten ABS-

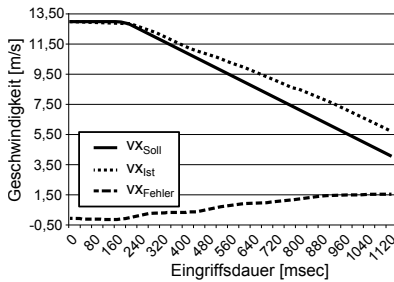
<sup>11</sup> Als Positionsgenauigkeit ist in diesem Absatz die Abweichung zwischen erreichter IST- und vorausberechneter SOLL-Position zu einem bestimmten Zeitpunkt gemeint. Dabei ist insbesondere die Abweichung in longitudinaler Richtung (x) wichtig, da diese für einen reinen Bremseneingriff die Kollisionszeit und damit auch die Trefferlage beeinflusst.



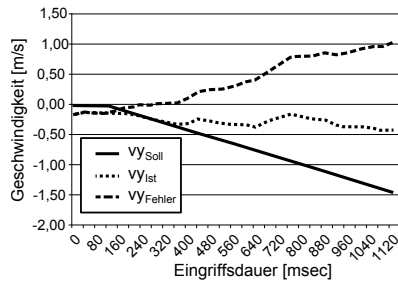
(a) Longitudinale Positionsgenauigkeit



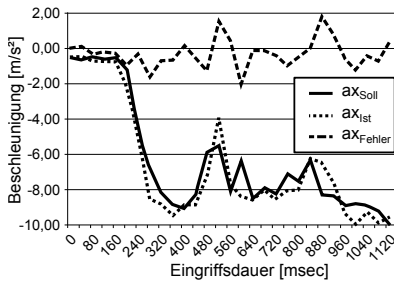
(b) Laterale Positionsgenauigkeit



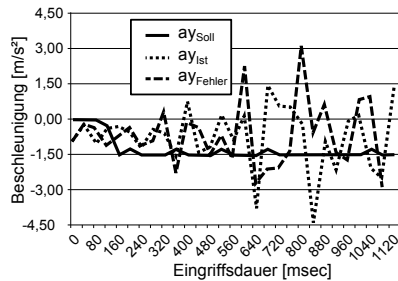
(c) Longitudinale Geschwindigkeitsgenauigkeit



(d) Laterale Geschwindigkeitsgenauigkeit



(e) Longitudinale Beschleunigungsgenauigkeit



(f) Laterale Beschleunigungsgenauigkeit

**Abbildung 5.6:** Kombierter Brems- und Lenkeingriff bei 46,9 km/h. Angefordert wurden maximal  $-10,0 \text{ m/s}^2$  Verzögerung (longitudinal) und  $-1,44 \text{ m/s}^2$  Querbesehleunigung (lateral). Deutlich wird der Unterschied zwischen der Prädiktionsgüte für den longitudinalen Beschleunigungsverlauf (ABS-Regeleingriffe berücksichtigt) im Vergleich zum lateralen Beschleunigungsverlauf (Gleiten und Wanken).

**Tabelle 5.1:** Leistungsvergleich Bremsbooster, ESP-Pumpe und Mensch

	Bremsbooster	ESP	Mensch
Totzeit	70 ms	130 ms	—
Druckaufbauzeit (0-100 bar)	280 ms	800 ms	130 ms
Druckaufbaugradient	357 bar/s	125 bar/s	769 bar/s
Totzeit Verzögerung	150 ms	150 ms	—
Zeit bis $-8 \text{ m/s}^2$	200 ms	600 ms	90 ms
Verzögerungsgradient	$40 \text{ m/s}^3$	$13 \text{ m/s}^3$	$88 \text{ m/s}^3$

Eingriffs deutlich, der etwas früher und stärker als berechnet den Bremsdruck reduziert. Der resultierende Geschwindigkeitsfehler setzt sich fort und mit dem dritten ABS-Eingriff, bei ca. 880 ms, verstärkt er sich zusätzlich. Tabelle 5.2 listet die auftretenden Fehler auf. Der Fehler der Verzögerung beträgt im Mittel  $0,27 \text{ m/s}^2$ . Mittelwert und Median des Geschwindigkeitsfehlers ( $0,79 \text{ m/s}$  bzw.  $0,83 \text{ m/s}$ ) ergeben bezogen auf die Auslösegeschwindigkeit von  $13,02 \text{ m/s}$  eine Abweichung von ca. 6 %. Diese Abweichung wirkt sich vor allem am Ende des Eingriffs auf die Positionsgenauigkeit aus. Der Median der Positionsabweichung beträgt  $0,14 \text{ m}$ . Die Gesamtabweichung am Ende beträgt durch die Fehlerfortsetzung  $0,88 \text{ m}$ .

**Tabelle 5.2:** Zusammenfassung der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsfehler der Versuche zur kombinierten Brems- und Lenkgenauigkeit aus Abbildung 5.6

	Longitudinal	Lateral
Beschleunigungsfehler (Median)	$0,28 \text{ m/s}^2$	$0,74 \text{ m/s}^2$
Geschwindigkeitsfehler (Median)	$0,83 \text{ m/s}$	$0,31 \text{ m/s}$
Geschwindigkeitsfehler (Gesamt)	$1,59 \text{ m/s}$	$1,03 \text{ m/s}$
Positionsfehler (Gesamt)	$0,80 \text{ m}$	$0,25 \text{ m}$
Positionsfehler (Median)	$0,14 \text{ m}$	$0,06 \text{ m}$

Analog ist das Vorgehen zur Bestimmung der Positionsgenauigkeit für den lateralen Versatz durch die Lenkung. Zu beachten ist, dass bei der Kombination von Bremsung und Lenkung die Stellen ermittelt werden müssen, bei denen das zulässige Kraftschlusspotenzial überschritten wird. Die reine Querbeschleunigung baut sich schneller auf als die Längsverzögerung, allerdings können marktübliche Serienreifen im Grenzbereich weniger Quer- als Längskräfte übertragen, wenn kombiniert eingegriffen wird. Abbildung 5.6d zeigt, dass zu Versuchsbeginn eine geringe laterale Geschwindigkeit vorlag, die im Laufe des Eingriffs nur geringfügig geändert werden konnte, da sich keine konstante Querbeschleunigung aufbauen konnte. Die Querbeschleunigung sollte sich, wie in Abbildung 5.3 gezeigt, prinzipiell schneller als die Längsverzögerung aufbauen. Es kommt jedoch zu keinem konstanten Geschwindigkeitsaufbau und bei ca. 280 ms beginnt das Fahrzeug seitlich, über das kurvenäußere Rad, zu rutschen. Dadurch kommt es zu einer gegenläufigen Wankbewegung im Fahrzeug und damit zu einer Querbeschleunigung entgegen der vorherigen Querbeschleunigungsrichtung. Infolge des ABS Eingriffs sinkt der Bremsdruck und die Längsbeschleunigung fällt ab. Durch den steigenden Schlupf kommt es damit wieder zu einem Aufbau der Querrichtung und einer Querbeschleunigung in die angeforderte Richtung, die nun zunächst die gegenläufige Wankbewegung ausgleichen muss. Dieses Verhalten wiederholt sich mehrfach bis zum Ende des Eingriffs. Die laterale Positionsgenauigkeit in Abbildung 5.6b erscheint bis ca. 640 ms genauer zu sein als die longitudinale Position. Dies ist aber auf die geringe, bei Auslösung nicht berücksichtigte, Quergeschwindigkeit bei Eingriffsbeginn zurückzuführen.

Eine mögliche Lösung für dieses Problem sieht vor bei Erkennung eines ABS Regeleingriffs zur Kompensation eine höhere Querbeschleunigung für die restliche Eingriffsdauer anzufordern und den maximal anforderbaren Bremsdruck in der Trajektorienberechnung entsprechend zu begrenzen. Die Modellierung dieser Effekte wurde im Rahmen der Arbeit nicht abschließend untersucht und ist Gegenstand zukünftiger Arbeiten. Für diese Arbeit wurden die Kennfelder dahingehend beschränkt, dass der angeforderte laterale Versatz durch die Lenkung bis zum Erreichen des ersten ABS Eingriffs (für einen



angenommenen Reibwert) aufgebaut werden konnte bzw. in bestimmten Bereichen durch eine Begrenzung<sup>12</sup> des Bremsdrucks erreicht werden konnte.

Für einen reinen Bremseingriff sind im Anhang in Abbildung A.5 drei Versuche ohne Lenkung mit Nachregelung dargestellt. Die Bedingungen während des Versuchs waren optimal bezüglich Asphalt, Temperatur, Reifenzustand, Beladung etc.. Die Versuche wurden direkt hintereinander gefahren und sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Angefordert wurde eine Verzögerung von  $-9,5 \text{ m/s}^2$ , die sehr nahe am ABS-Regelbereich liegt, um zu zeigen wie präzise das Fahrzeug an der Haftgrenze geführt werden kann. Die Fehler gehen vor allem auf eine pessimistische Schätzung des Verzögerungsaufbaus am Anfang des Eingriffs zurück. Der resultierende Gesamtfehler zeigt aber auch die Grenze der Positionsrichtigkeit auf, die im praktischen Versuch im Laufe der Projektjahre erreicht werden konnte.

**Tabelle 5.3:** Zusammenfassung der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsfehler der Versuche zur Bremsgenauigkeit aus Abbildung A.5. Die Gesamtangabe bezieht sich auf das Ende des Eingriffs. Die Mediane geben die Abweichung während des Eingriffs an.

	Versuch Nummer:		
	1	2	3
Beschleunigungsfehler (Median)	0,09 $\text{m/s}^2$	0,05 $\text{m/s}^2$	0,30 $\text{m/s}^2$
Geschwindigkeitsfehler (Median)	0,37 $\text{m/s}$	0,31 $\text{m/s}$	0,45 $\text{m/s}$
Geschwindigkeitsfehler (Gesamt)	0,64 $\text{m/s}$	0,58 $\text{m/s}$	0,42 $\text{m/s}$
Positionsfehler (Gesamt)	0,35 $\text{m}$	0,25 $\text{m}$	0,41 $\text{m}$
Positionsfehler (Median)	0,075 $\text{m}$	0,025 $\text{m}$	0,125 $\text{m}$

---

<sup>12</sup>Beispielsweise bei sehr hoher Geschwindigkeit des querenden Fahrzeugs, geringer eigener Geschwindigkeit und sehr geringen Abständen zum Kollisionspunkt, um zu verhindern, dass das Fahrzeug in der Fahrgastzelle gestoßen wird und möglicherweise dadurch auf die Seite kippt.

### **5.1.2 Erprobung im Prüfgelände**

Im Prüfgelände wird das querende Objekt durch eine Windenanlage gezogen. Als Objekt wird das Bild eines Volkswagen Passat CC im Maßstab 1:1 verwendet. Das Bild ist mittig geteilt und jeweils an einer aufblasbaren Struktur aus Gummi befestigt. Diese stehen wiederum auf einem überfahrbaren Transportschlitten, der von der Winde gezogen wird. Die Winde wird über eine Lichtschranke aktiviert. Dadurch kann praktisch jede Position in Relation zum Versuchsträger eingestellt werden. Notwendig ist dafür eine konstante Anfahrtschwindigkeit des Versuchsträgers, die über das direkte Ansteuern der Motorsteuergerät-Schnittstelle für den Tempomaten realisiert wird. Da die Eingriffe zur Unfallfolgenminderung gezielt untersucht werden und um den Effekt von Verdeckung zu simulieren, befand sich im Abstand von ca. 15 m zur Kollision mindestens ein geparktes Fahrzeug. Abbildung 5.7a zeigt den Versuchsaufbau. Das Zielobjekt sowie der Rammschutz, die beide in den Kamerabildern in Abbildung 5.7 sichtbar sind, finden sich in Abbildung 5.7b.

Abbildung 5.7 zeigt den Zustand eines Versuchs zu vier Zeitpunkten. Das Zielobjekt wird erstmalig bei einem Abstand von 15 m erkannt. Abbildung 5.7d zeigt oben links in der Mexican-Hat Filterung<sup>13</sup>, wie klein das Zielobjekt im Vergleich zum seitlich geparkten Fahrzeug ist. Die Waldkante im Hintergrund hat während der Versuche immer wieder zu Problemen mit der Bildererkennung geführt. Sie ist auch im oberen Teil der Mexican-Hat Filterung sichtbar. Eine stabile Horizontschätzung ist daher notwendig, um die ausgewerteten Bildbereiche möglichst klein zu halten. Im unteren Bildteil sind die Entfernungen und die Position sichtbar. In den ca. 700 ms zwischen Abbildung 5.7d und Abbildung 5.7e haben sich Fahrzeug und Ziel lateral und longitudinal um die Hälfte angenähert. Praktisch direkt nach der Erfassung beginnt im Fahrzeug die Warnung. Die Warnung durchläuft dabei verschiedene Eskalationsstufen und orientiert sich an den Empfehlungen aus Hesse et al. (2012) und Rhede et al. (2011). Abbildung 5.7c zeigt den Innenraum in der maximalen Warnstufe. Sichtbar sind die Warnungen im Multifunktionsdisplay sowie durch die Warnleiste auf dem Instrumententräger.

In Abbildung 5.7f hat das Objekt die minimale Distanz zum Sensor unterschritten und wird nicht mehr erkannt. Das Objekt ist noch vollständig

---

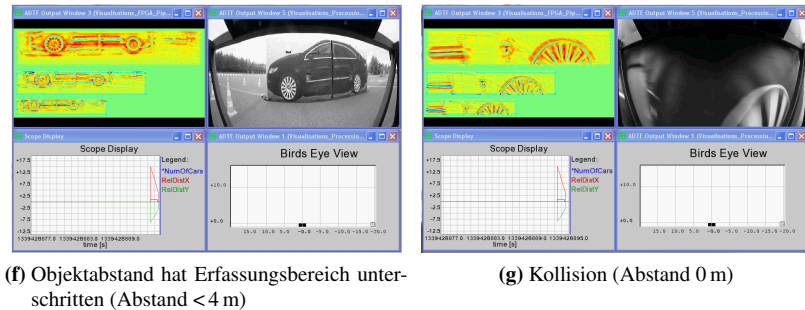
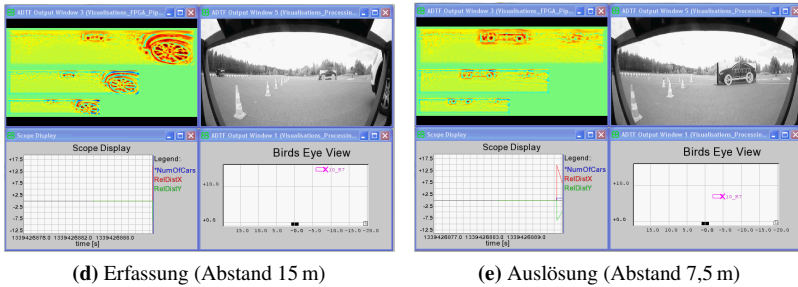
<sup>13</sup>Vergleiche Sychrovský et al. (2013a).

im Sichtbereich und könnte detektiert werden. Die Detektion war jedoch absichtlich begrenzt. Die Rate der Fehlerkennungen (false-positive) steigt beim verwendeten Verfahren mit der zulässigen Größe eines Objekts, da die zueinander gehörenden Räder in immer größeren Bildbereichen gesucht werden. Fusioniert man die Objekte der Bildverarbeitung mit einem zusätzlichen Radarsensor, ist dieses Problem adressierbar. Die stabilere Objekthypothese des Radarsensors kann um die Information zur Größe und zu den Achsen aus der Bildverarbeitung ergänzt werden. Für die durchgeführten Versuche bewegten sich die Zielobjekte immer mit konstanter Geschwindigkeit, daher hat dieser Effekt auf die prototypische Erprobung keinen Einfluss. Abbildung 5.7g macht zudem deutlich, dass das Objekt vor der Kollision den Erfassungsbe- reich der Kamera deutlich überschreitet und sich nur noch ein kleiner Teil vom Fahrzeug im Bild befindet.

Die praktische Erprobung hat zudem verdeutlicht, wie gering das Missbrauchspotenzial ist. In Fahrdemonstrationen, bei denen die Fahrer eine Einweisung in das System bekommen hatten und gezielt die Auslösung zur Unfallvermeidung testen wollten, hatte die überwiegende Mehrzahl der Fahrer bereits vor der Auslösung gebremst. Danach gefragt, erklärten diese stets, dass sie vermutet hätten, das System funktioniere nicht richtig, da es zum Zeitpunkt ihres Eingriffs „längst hätte bremsen müssen“. Dieses Verhalten wurde nicht repräsentativ erhoben, es verdeutlicht jedoch, wie bedrohlich selbst ein Schaumstoffziel wirken kann, wenn es, das Sichtfeld ausfüllend, im Abstand weniger Meter vor dem Fahrzeug steht.

Abbildung 5.8a zeigt den Versuchsaufbau im veHIL. Analog zu den Versuchen im Prüfgelände zieht eine Winde einen Schlitten mit dem Zielobjekt. Das Objekt besteht aus Pappe, die erheblich leichter als die aufblasbare Variante ist und so mit höheren Geschwindigkeiten angefahren werden kann. Die Kontur des Zielobjekts entspricht der eines etwas verkleinerten Volkswagen Golfs. Die Räder können in beliebigen Größen angeklebt werden und sind mit einer, dem Zielobjekt vergleichbaren, Textur bedruckt. Die Position des Zielobjekts wird per Laserdistanzmessung zum Halter gemessen.

Abbildung 5.9 zeigt fünf direkt hintereinander durchgeführte Versuche. Ausgehend von der Trefferlage TL 4 ohne einen Eingriff wurde ein Eingriff zur Trefferlagenänderung durchgeführt. Das Ziel des Eingriffs war es TL 10 zu erreichen. Ein reiner Bremseneingriff erfolgte dafür im letzten möglichen



**Abbildung 5.7:** Exemplarischer Versuchsablauf im Prüfgelände. Die Bilder (d) bis (g) zeigen die Objekterfassung zu vier Zeitpunkten. Die Ausgangsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs betrug  $v_{0, \Sigma} = 50 \text{ km/h}$ , das Zielobjekt wurde mit ca.  $20 \text{ km/h}$  bewegt. Dargestellt sind pro Bild (oben, links) das Klassifikatorergebnis nach der Mexican-Hat Filterung pro potenzieller Felgenposition, (oben, rechts) das zugehörige Kamerabild, (unten, links) der Abstand in Metern der X- und Y-Richtung (Rel-DistX, Rel-DistY) zum Zielobjekt sowie (unten, rechts) eine Draufsicht auf die Fahrzeugposition.



(a) Trefferlage ohne Eingriff (TL 4)



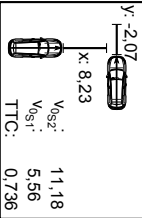
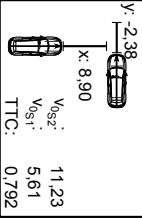
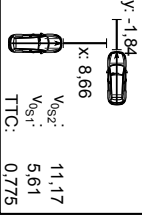
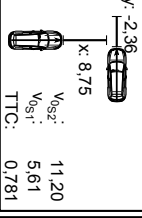
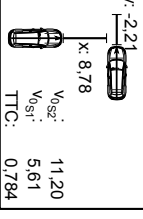
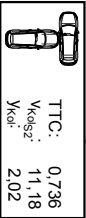
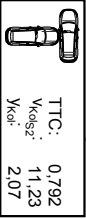
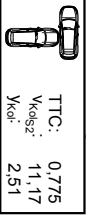
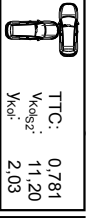
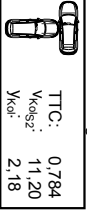
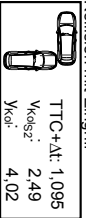
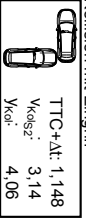
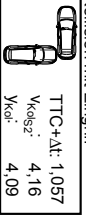
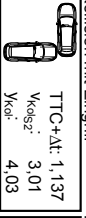
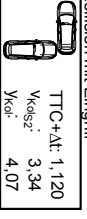
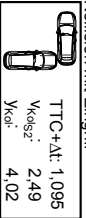
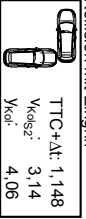
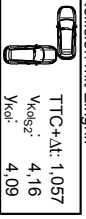
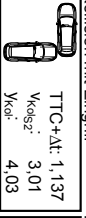
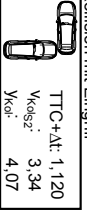
(b) Detailansicht (Messpunkt am Halter)

**Abbildung 5.8:** Versuchsträger und Zielobjekt im veHIL

Moment. Die Position des Versuchsträgers und des Zielobjekts wurden zentral im veHIL aufgenommen. Am Versuchsträger war zusätzlich ein Kontakt-sensor befestigt, um den Zeitpunkt der Kollision zu bestimmen. Die Position des Versuchsträgers wurde über ein optisches Correvit Messsystem aufgenommen.

Die Auswertungen der mitgeloggten Daten sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Genauigkeit wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, zum einen durch die Ermittlung des Kollisionszeitpunktes und Kollisionsortes, zum anderen durch den Fehler beim Bremsen. Der Median der Abstandsmessung bei Auslösung betrug 8,75 m. Der Median des Messfehlers dieser Abstandsmessungen betrug 0,14 m. Die Standardabweichung des Messfehlers betrug 0,12 m. Für die Ausgangsgeschwindigkeit resultiert daraus ein Fehler bei der Bestimmung der TTC in der Größenordnung von ca. 10 ms.

Um die Latenz der Bildaufnahmen und -verarbeitung (90 ms) sowie die schwankende Latenz der nicht echtzeitfähigen Systemrechner auszugleichen, wurden die gemessenen Daten entsprechend korrigiert. Der Median dieser Latenzkorrekturfehler betrug 19 ms. Diese Fehler führen in Summe zu einem Fehler der berechneten TTC. Der Median dieses Fehlers beträgt 14 ms, allerdings ist die Standardabweichung dazu mit 38,9 ms sehr hoch. Dieser hohe Unterschied erklärt sich durch die Zykluszeit des Systems. Die Bildverarbei-

Szenario	1. Versuch	Szenario	2. Versuch	Szenario	3. Versuch	Szenario	4. Versuch	Szenario	5. Versuch
 <p> <math>y: -2.07</math>  <math>x: 8.23</math>  <math>V_{0s2}:</math> 11,18  <math>V_{0s1}:</math> 5,56  <math>TTC:</math> 0,736         </p>	 <p> <math>y: -2.38</math>  <math>x: 8.90</math>  <math>V_{0s2}:</math> 11,23  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>TTC:</math> 0,792         </p>	 <p> <math>y: -1.84</math>  <math>x: 8.66</math>  <math>V_{0s2}:</math> 11,17  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>TTC:</math> 0,775         </p>	 <p> <math>y: -2.36</math>  <math>x: 8.75</math>  <math>V_{0s2}:</math> 11,20  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>TTC:</math> 0,781         </p>	 <p> <math>y: -2.21</math>  <math>x: 8.78</math>  <math>V_{0s2}:</math> 11,20  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>TTC:</math> 0,784         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,736  <math>V_{0s2}:</math> 11,18  <math>V_{0s1}:</math> 5,56  <math>Y_{Kol}:</math> 2,02         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,792  <math>V_{0s2}:</math> 11,23  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,07         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,775  <math>V_{0s2}:</math> 11,17  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,51         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,781  <math>V_{0s2}:</math> 11,20  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,03         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,784  <math>V_{0s2}:</math> 11,20  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,18         </p>
 <p> <math>TTC:</math> 0,736  <math>V_{0s2}:</math> 11,18  <math>V_{0s1}:</math> 5,56  <math>Y_{Kol}:</math> 2,02         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,792  <math>V_{0s2}:</math> 11,23  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,07         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,775  <math>V_{0s2}:</math> 11,17  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,51         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,781  <math>V_{0s2}:</math> 11,20  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,03         </p>	 <p> <math>TTC:</math> 0,784  <math>V_{0s2}:</math> 11,20  <math>V_{0s1}:</math> 5,61  <math>Y_{Kol}:</math> 2,18         </p>	 <p> <math>TTC+Δt:</math> 1,095  <math>V_{0s2}:</math> 2,49  <math>V_{Kol}:</math> 4,02         </p>	 <p> <math>TTC+Δt:</math> 1,148  <math>V_{0s2}:</math> 3,14  <math>V_{Kol}:</math> 4,06         </p>	 <p> <math>TTC+Δt:</math> 1,057  <math>V_{0s2}:</math> 4,16  <math>V_{Kol}:</math> 4,09         </p>	 <p> <math>TTC+Δt:</math> 1,137  <math>V_{0s2}:</math> 3,01  <math>V_{Kol}:</math> 4,03         </p>	 <p> <math>TTC+Δt:</math> 1,120  <math>V_{0s2}:</math> 3,34  <math>V_{Kol}:</math> 4,07         </p>

**Abbildung 5.9:** Eckdaten von fünf im veHIL durchgeführten Versuchen nach Heck et al. (2013). Die verschiedenen Versuche sind von links nach rechts dargestellt. Von oben nach unten sind pro Versuch die Situation bei Auslösung, die Kollisionskonstellation ohne Eingriff und die erreichte Kollisionskonstellation dargestellt. Die obere Box zeigt die Messwerte des veHILs bei Auslösung. Angegeben sind der Abstand in X-Richtung für den Versuchsträger ( $x$  [m]) und dessen Geschwindigkeit ( $v_{0s2}$  [m/s]). Über die TTC (TTC [s]) und die Geschwindigkeit des Zielobjekts ( $v_{0s1}$  [m/s]) wird die zurückgelegte Strecke bis zur Kollision ohne Eingriff ( $y$  [m]) angegeben. Diese variiert je nach Versuch durch die Anfahrgegeschwindigkeit der Winde. Die mittlere Box zeigt die vom System bestimmten Werte für eine Kollision ohne Eingriff bei gleichbleibender Geschwindigkeit ( $v_{Kol2}$  [m/s]). Die TTC ist nicht die vom System berechnete, sondern die reale im veHIL bestimmte. Daher enthält die berechnete Trefferlage ( $y_{Kol}$  [m]) in dieser Darstellung sämtliche Fehler aus Tabelle 5.4. Die unterste Box stellt die Messwerte zum Zeitpunkt der Kollision dar.  $TTC+Δt$  [s] ist die tatsächliche Dauer des Eingriffs bis zur Kollision. Zusätzlich sind die Kollisionsgeschwindigkeit ( $v_{Kol2}$  [m/s]) und die Trefferlage ( $y_{Kol}$  [m]) angegeben.

**Tabelle 5.4:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aus Abbildung 5.9. Die Abstandswerte sind in X-Richtung vom Versuchsträger angegeben. Die Werte zur Trefferlage sind in Y-Richtung vom Versuchsträger angegeben und beziehen sich auf die Fahrzeugfront des Zielobjekts.

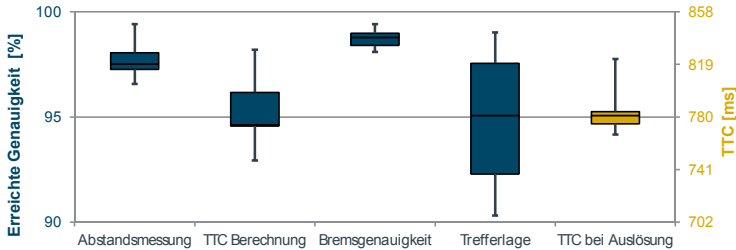
	Versuchsnummer				
	1	2	3	4	5
Gemessener Abstand [m]	8,23	8,90	8,66	8,75	8,78
Messfehler Abstand [m]	0,16	0,22	-0,05	0,30	0,24
Abstandsfehler Bremsung [m]	0,10	-0,17	-0,05	0,14	-0,09
Berechnungsfehler TTC [ms]	-40	56	14	-42	30
Latenzkorrekturfehler [ms]	14	19	-4	27	21
Berechnete Trefferlage [m]	4,02	4,06	4,09	4,03	4,07
Resultierende Trefferlage [m]	3,71	4,26	4,19	3,64	4,11
Trefferlagenfehler [m]	0,30	-0,20	-0,10	0,39	-0,04

tung gibt eine feste Zykluszeit von 39 ms vor. Dadurch kommt es zu Diskretisierungsfehlern hinsichtlich des Zyklus, in dem ein Objekt erkannt und verarbeitet wird.

Zusätzlich ergibt sich durch den Eingriff ein Positionsfehler zwischen geplanter und realisierter Verzögerung. Dieser Fehler ist im Median mit -0,05 m sehr klein und beträgt im Verhältnis zum Median des Abstands ca. 0,6%. Allerdings ist auch hier die Standardabweichung mit 0,11 m auffällig. Der Fehler entsteht nicht durch ABS-Eingriffe, da die Verzögerung auf  $9,5 \text{ m/s}^2$  in der Funktion limitiert wurde und der Belag im veHIL einen Reibwert von  $\mu = 1,2$  hat.

In Summe entsteht durch diese Einflüsse ein Trefferlagenfehler in Y-Richtung. Der Median des Trefferlagenfehlers beträgt -0,04 m (eine Abweichung in Richtung Fahrzeugheck). Dabei können sich die Fehler gegenseitig aufheben oder verstärken. Bestimmend ist jedoch die korrekte Berechnung der TTC, wie am Beispiel von Versuchsnummern 1 und 4 deutlich wird. In beiden Fällen war die berechnete TTC ca. 40 ms geringer als real. Ausgehend von einer Ausgangsgeschwindigkeit des Ziels von 5,61 m/s betrug

der Positionsfehler bei Auslösung damit schon ca. 0,22 m. Die erreichten Genauigkeiten sind in Abbildung 5.10 grafisch zusammengefasst.

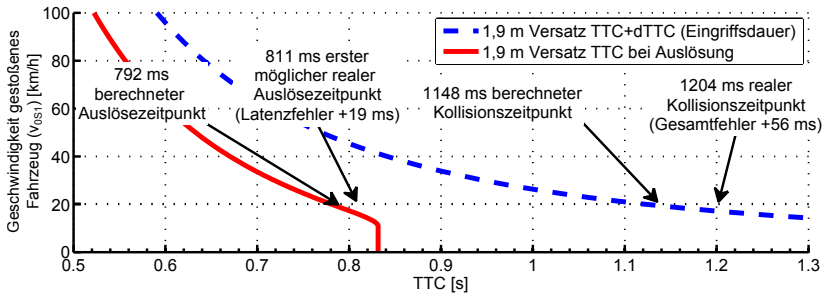


**Abbildung 5.10:** Darstellung der erreichten Genauigkeiten. Für die Abstandsmessung und TTC Berechnung ist diese Angabe relativ zur realen Position bzw. zeitlichen Entfernung zu verstehen. Die Genauigkeit der Bremse und der Trefferlage sind als Abweichung zwischen berechneter und realisierter Fahrzeugposition zu verstehen. Zusätzlich ist der Boxplot der berechneten TTC bei Auslösung angegeben. Der Einfluss der um einen Zyklus verschobenen Auslösung hebt sich deutlich von den systeminhärenten Varianzen um den Median ab.

Abbildung 5.11 zeigt die Berechnung des Auslösezeitpunkts durch die Funktion in Versuch 2. Die durchgezogene Kurve (rot) gibt die benötigte TTC bei Auslösung an. Der berechnete Auslösezeitpunkt liegt genau auf der Auslöseschwelle, um einen benötigten Versatz von 1,9 m zur Trefferlagenänderung zu erreichen. Durch den Latenzfehler erfolgte die Auslösung 19 ms früher. Der Eingriff führte durch die Geschwindigkeitsabnahme zu einer Verlängerung der Zeit bis zur Kollision (dTTC). Die gestrichelte Kurve (blau) zeigt die Berechnung der benötigten Auslösezeit für diese kombinierte Zeitangabe (TTC+dTTC). Der berechnete Kollisionszeitpunkt liegt sehr dicht an der Kurve. Durch den Latenzfehler kommt es jedoch zu einer früheren Auslösung und damit zu einem größeren Geschwindigkeitsabbau bzw. höherer dTTC. Bezogen auf die gesamte Eingriffszeit steigt der Trefferlagenfehler durch diese zusätzliche Verzögerung weiter an.

In der abschließenden externen Beurteilung durch TNO wurde dem System für die getesteten Szenarien eine „gute Performance“ attestiert (Fahren-





**Abbildung 5.11:** Berechnung der benötigten TTC, um eine 1,9 m große Trefferlagenänderung durch Bremsung zu generieren (rot, durchgezogen) aus Versuch 2. Zusätzlich ist die Eingriffsdauer (TTC+dTTC) angegeben, um eine 1,9 m große Trefferlagenänderung durch Bremsung zu generieren (blau, gestrichelt). Die Fehler zur TTC und die resultierende Fehlerfortpflanzung sind im Text erläutert.

krog et al. 2013, Abschnitt 3.3.1). In den 51 durchgeführten Versuchen<sup>14</sup> hat die Funktion wie erwartet einen Eingriff ausgeführt, ohne beobachtbare Fehlauslösungen (False-positive). Die im Rahmen des EU-Projekts interactive formulierten Hypothesen und Anforderungen an das Gesamtsystem konnten (soweit zutreffend) statistisch signifikant nachgewiesen werden (Fahrenkrog et al. 2013, Abschnitt A1.3.1.3).

## 5.2 Das unfallfolgenmindernde System in der Simulation

Neben der praktischen Erprobung war ein Ziel durch Probandenstudien das Verhalten der Fahrer auf Eingriffe im Querverkehr zu untersuchen. Der folgende Abschnitt stellt die durchgeführten Studien analog der Reihenfolge ihrer Durchführung vor. Zunächst wurden am DLR grundlegende Untersuchun-

<sup>14</sup>37 Versuche wurden auf dem Prüfgelände von Volkswagen unter der Aufsicht von TNO und 14 Versuche im veHIL durchgeführt. Dabei wurden Versuche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, Szenarien und Eingriffsarten (Bremsen teilweise kombiniert mit Lenken) durchgeführt. Vergleiche Fahrenkrog et al. (2013, Abschnitt A1.2).

gen zu Drehbewegungen am Lenkrad durchgeführt. Dann wurde das System zunächst im echten Fahrzeug mit einem Vehicle in the Loop System getestet. Abschließend wurde dasselbe Szenario in einer Studie im dynamischen Fahrsimulator extern am CTAG durchgeführt. Die beiden im EU Projekt interactIVe durchgeführten Studien sind bereits veröffentlicht und sollen hier nur kurz zusammengefasst werden.

### **5.2.1 Untersuchung am DLR**

Die Untersuchung am DLR hatte zum Ziel grundlegende Fragestellungen der Eingriffe am Lenkrad in Querverkehrskollisionen zu untersuchen.<sup>15</sup> Dafür wurde zunächst eine Querverkehrssituation erzeugt, bei der die Fahrer das querende Fahrzeug zwei Sekunden vor Kollision sahen und theoretisch den Unfall hätten vermeiden können. Während der zwei Sekunden wurde am Lenkrad eine Drehung mit maximal 7 Nm durchgeführt, um die Trefferlage zu ändern. Nach der Kollision wurden die Fahrer über das Systemverhalten informiert und die Fahrt neu gestartet. Nach einer Zeitspanne zur Gewöhnung wurde eine weitere Querverkehrsgefahrensituation erzeugt. Ziel war es zu untersuchen, ob und wie die Fahrer im Vergleich auf die Drehung reagieren. Anschließend wurde die Fahrt erneut fortgesetzt und es folgte noch ein Eingriff am Lenkrad, ohne dass eine Gefahrensituation vorlag, um eine Fehlauslösung zu simulieren. (Brockmann et al. 2012, Abschnitt 6.1)

Da der Fahrsimulator keine Dynamik erlaubt, wurde vom System keine Bremsung ausgelöst. Es erfolgte aber ein entsprechender Warnton. Um mögliche Richtungseinflüsse zu untersuchen, wurden die Probanden in vier Gruppen unterteilt, um beide Fahrtrichtungen und Kollisionen sowohl von links wie auch von rechts abzudecken. Es konnte kein statistisch signifikanter Unterschied für die Reaktionszeit bis zur vom Fahrer initiierten Bremsung gefunden werden. In der ersten Kollision haben 45 % der Probanden gebremst, 12 % der Fahrer gelenkt und 10 % der Fahrer gelenkt und gebremst. Die Reaktionszeit zum Bremsen lag zwischen 350 ms und 510 ms. Nur 22 % der Fahrer nahmen eine Drehung am Lenkrad wahr. In der zweiten Kollision haben nur 30 % der Probanden gebremst, 10 % gelenkt und 5 % gebremst und gelenkt.

---

<sup>15</sup>Angaben zu den 40 Probanden finden sich in Brockmann et al. (2012, Abschnitt 6.1.3).

Die Probanden haben dabei teilweise das Lenkrad losgelassen. In beiden Versuchen wurde jedoch mehrheitlich das Lenkrad festgehalten und die Drehung dadurch unterbunden. (Brockmann et al. 2012, Abschnitt 6.2)

Ehrenpfordt et al. (2008) stellen fest, dass ein Ruck am Lenkrad reflexartig zur Unterbindung der Drehung führt. Die Ergebnisse des dritten Versuchs mit einer Fehlauflösung scheinen dies zu bestätigen. Alle Fahrer unterbanden die Handlung. Der erreichte Versatz betrug  $\bar{0}$  ( $0,05 \pm 0,36$ ) m. Die Fahrer brauchten zwischen 550 ms und 950 ms, um das Fahrzeug in die ursprüngliche Spur zu führen. 22 % der Fahrer traten während der Fehlauflösung zusätzlich auf die Bremse. (Brockmann et al. 2012, Abschnitt 6.2)

Brockmann et al. (2012, Abschnitt 6.3) fassen zusammen, dass die Mehrheit der Fahrer eine unerwartete Lenkraddrehung reflexartig unterbindet. Die Erklärung des Systemverhaltens führt bei Wiederholungen dazu, dass ein Teil der Fahrer das Lenkrad vollständig loslässt. Zudem sind sich die Fahrer mehrheitlich nicht des Eingriffs am Lenkrad bewusst.

### 5.2.2 Untersuchung bei Volkswagen

Zur Evaluierung des Fahrerverhaltens wurde zwischen April und Mai 2012 eine Studie<sup>16</sup> im Versuchsträger mit einem Vehicle in the Loop System durchgeführt.<sup>17</sup> Als System wurde das ViL der Firma Carmeq verwendet. Die Probanden hatten eine undurchsichtige Brille auf und sahen ausschließlich eine virtuelle 3D-Welt, wie in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Untersuchung eines Assistenzsystems mit einer Vehicle in the Loop Simulation hat den Vorteil, dass die auf den Fahrer wirkenden Beschleunigungen genau denen entsprechen, die später in der Realität auftreten. Sichergestellt werden muss, dass die dem Fahrer eingeblendete virtuelle Welt zu den Bewegungen des Fahrzeugs passt.

Der Versuch bestand aus dem praktischen Fahrversuch und einer anschließenden Befragung. An der hier vorgestellten Studie nahmen insgesamt 59

---

<sup>16</sup>Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits in Heck et al. (2013) vorgestellt und wird hier erneut aufgegriffen.

<sup>17</sup>Bock et al. (2005) liefern eine Beschreibung und Einführung in das Thema Vehicle in the Loop zum Testen von Fahrerassistenzsystemen. Vergleiche auch Bock et al. (2008) bzw. Bock (2012).

Probanden teil. Aufgrund von Problemen bei der Datenaufzeichnung konnten nur 50 Fahrversuche ausgewertet werden. Das System hat aber in allen Fällen richtig funktioniert, daher werden für die subjektive Beurteilung alle 59 Fragebögen ausgewertet. Der verwendete Fragebogen sowie eine vollständige Angabe der Antworten befinden sich im Anhang in Abschnitt A.8. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Fragen und die Versuchsergebnisse erläutert.

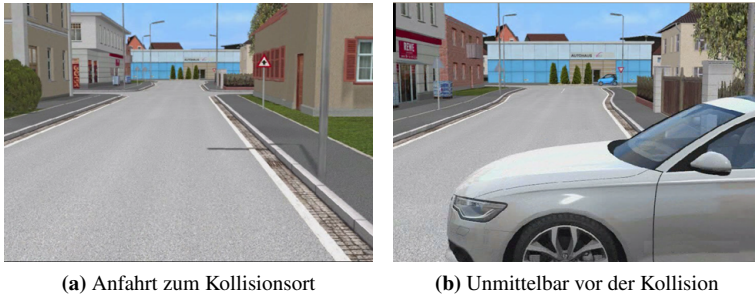
### Versuchsaufbau

Während des Versuchs fuhren die Probanden durch eine urbane Szenerie. Die Geschwindigkeit war frei wählbar und sollte bei ca. 50 km/h liegen. Die Fahrer wurden vor Versuchsbeginn darüber informiert, dass im Fahrzeug ein „neuartiges“ Notbremssystem verbaut ist, ohne detailliert auf den Aspekt des Querverkehrs oder die Funktionen einzugehen. Nach einer Eingewöhnungsphase von ca. 10 Minuten nahm ein querendes Fahrzeug (gleich verteilt von links und rechts kommend) dem Probanden die Vorfahrt. Das Fahrzeug hatte eine Geschwindigkeit von ca. 30 km/h und war erst 1,3 Sekunden vor der Kollision sichtbar. Abbildung 5.12 zeigt das Sichtfeld des Fahrers bei der Anfahrt zum Kollisionsort sowie vor der Kollision. Die resultierende Trefferlage war durch den Abstand der sichtverdeckenden Gebäude so vorgegeben, dass es ohne Eingriff zu einer Kollision im Bereich TL 4 kommt.

Der Eingriff durch das System wurde in zwei festkonfigurierten Stufen ausgelöst, um keine Unterschiede zwischen den Versuchen zu erzeugen. 700 ms vor der Kollision erfolgte ein Vollbremseingriff zur Trefferlagenänderung. Parallel wurde die maximale Warnung mit LED-Leiste, Warnton und Anzeige im Kombidisplay ausgelöst. 100 ms später erfolgte noch ein Lenkeingriff mit 8 Nm in Richtung des Fahrzeughecks. Eine Übersteuerung bzw. ein Abbruch dieser Eingriffe war durch den Fahrer nicht möglich.

### Ergebnis – Fahrerreaktion

Die Auslösegeschwindigkeit betrug  $\bar{O}(42 \pm 7,6)$  km/h und lag damit etwas unter den geplanten 50 km/h. Die Trefferlage ohne Eingriff hat dementspre-



**Abbildung 5.12:** Fahrersichtfeld in der virtuellen 3D-Welt des Vehicle in the Loop Systems

chend etwas variiert. Ziel der Probandenstudie war jedoch die Evaluation der Fahrerreaktion und nicht die Evaluation der Positionspräzision.

42 % der Probanden hatten bei der Anfahrt auf die Kreuzung, noch bevor sie das querende Fahrzeug sehen konnten, den Fuß vom Gaspedal genommen. Allerdings haben nur 8 % vor dem Eingriff selbstständig angefangen die Bremse zu betätigen. Abbildung 5.13a zeigt, wann die Probanden anfangen zu bremsen und ab wann für diese Probanden der volle Bremsdruck anlag. Der Versuch wurde in einem Versuchsträger ohne Bremsbooster durchgeführt. Entsprechend langsam war der Druckaufbau für die Bremsung, der nur über die ESP-Pumpe erzeugt wurde. Der schnellere Druckanstieg ist aber vor allem für die Trefferlagenänderung notwendig. Für den Laien ist der Schnelligkeitsunterschied im Fahrzeug vermutlich schwer zu differenzieren. Obwohl alle Probanden entweder bereits vor dem Eingriff oder nur sehr kurz vor der Kollision anfangen zu bremsen, wurde, bedingt durch den langsamen Druckanstieg, nur für 80 % der volle Bremsdruck erreicht.

Abbildung 5.13b zeigt die Reaktion der Probanden auf die Bewegung des Lenkrades. Nach 250 ms hatten bereits 80 % der Probanden die Lenkbewegung gestoppt. Die erreichte Lenkwinkeländerung betrug  $\bar{\varnothing}(20 \pm 10,9)^\circ$ . Abbildung 5.13c gibt den kumulierten Zeitpunkt an, an dem die Probanden die Bewegung stoppten. Nach 300 ms, also der halben Eingriffsdauer, hat-

ten 100 % der Probanden das Lenkrad bereits gestoppt. In keinem Versuch konnte ein Querversatz von mehr als 0,2 m erreicht werden. Ein planmäßiger Eingriff hätte 0,66 m Versatz produziert.

### **Ergebnis – Fragebogen**

Eine vollständige Auflistung der Fragebogenergebnisse findet sich in Abschnitt A.8. Die Probanden gaben mehrheitlich (76 %) an, von der Situation überrascht worden zu sein. Drei Probanden empfanden die Situation und das Fahrzeug als unkontrollierbar, zwei Probanden wollten eine andere Lenkbewegung. Insgesamt wurde die Kontrollierbarkeit über das Lenkverhalten von 93 % als gegeben angesehen.

Nur 47 % bemerkten einen Systemeingriff. Davon haben 82 % einen Bremseneingriff bemerkt und 90 % ein Ruckeln/Vibration im Lenkrad. Hingegen haben nur 10 % explizit den Lenkeingriff wahrgenommen. Der Anfang des Eingriffs wurde von 75 % im richtigen Zeitraum („unmittelbar vor der Kollision“) eingeschätzt. Das Eingriffsende kann analog zur DLR Studie von 82 % der Probanden nicht genau benannt werden. 4 % der Probanden hätten Bedenken ein Fahrerassistenzsystem zu übersteuern, aber nur 8,5 % geben an das System übersteuert zu haben. Fünf Probanden gaben als Grund dafür an, dass sie selbst besser handeln könnten. Je zwei Probanden gaben dafür als Bedürfnis an, dass sie „einen geraden Aufprall erzwingen wollten“ bzw. stärker bremsen wollten.

Bezogen auf die Simulation hatten 15 % eine Unfallsituation erwartet. Zudem empfanden 33 % der Probanden eine fehlende Realitätsnähe aufgrund des eingeschränkten Sichtfeldes bzw. der Simulation. Dieser Wert kann jedoch durch die 9 Probanden, bei denen die Datenaufzeichnung Schwierigkeiten machte, beeinflusst sein. Bei ihnen musste der Versuch teilweise mehrfach neu gestartet werden.

### **Ergebnis – Zusammenfassung**

Die Ergebnisse bestätigen die Versuchsergebnisse der Untersuchung am DLR. Danach fixieren die Fahrer das Lenkrad sofort und verhindern somit das Weiterdrehen. Um sicherzustellen, dass eine Lenkung im kurzen Zeit-

fenster der Pre-Crash Phase durchgeführt wird, muss diese von der Drehung des Lenkrads entkoppelt werden oder mit mehr Drehmoment durchgeführt werden. Für eine Serienauslegung muss berücksichtigt werden, dass es sich bei der reflexartigen Unterdrückung der Lenkbewegung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um ein bewusstes Signal zum Abbruch des Eingriffs handelt.

Das Szenario war explizit darauf ausgelegt, den Fahrer zu überraschen. Damit sollte der Effekt simuliert werden, dass der Fahrer querenden Verkehr übersieht.<sup>18</sup> Nur 8 % der Fahrer haben vor der Kollision angefangen zu bremsen. Eine Eingriffszeit im Bereich von 700 ms scheint daher sinnvoll, um die Unfallfolgen bestmöglich zu mindern, wenn der Fahrer bis dahin nicht reagiert. Eine Reaktion des Fahrers kann dann entsprechend angepasst und, wenn notwendig, verstärkt werden.

Ein Problem der Trefferlagenänderung im Querverkehr ist es, dass die Probanden durch die Kombination mit dem Bremsdruck des Systemeingriffs eine Vollverzögerung erreichen. Der Auslösezeitpunkt muss paradoxerweise so gewählt sein, dass durch die Verstärkung des Fahrers nicht zu viel gebremst wird, um die Trefferlage nicht zu weit zu verschieben. Es ist zu diskutieren inwieweit ein System, dass die Trefferlage aktiv beeinflusst, nicht auch eine Bremsanforderung des Fahrers verringern darf, um das Überbremsen zu verhindern.

### 5.2.3 Untersuchung am CTAG

Analog zu den Versuchen im Vehicle in the Loop wurden die CTAG Versuche in einem dynamischen Fahrsimulator durchgeführt und die Probanden anschließend befragt. Das gefahrene Szenario war dabei sehr ähnlich und endete nach einer Eingewöhnungsphase, um mit dem Simulator vertraut zu werden, in einer unvermeidbaren Querverkehrskollision.

Die Versuchsmethodik ist in Fahrenkrog et al. (2013, Abschnitt A2.3.1.2) beschrieben. Die Probanden wurden in drei Gruppen eingeteilt, in eine Kontrollgruppe ohne System, eine Blindgruppe, die nicht wusste, dass ein System

---

<sup>18</sup>Nach Staubach (2009a) die häufigste Unfallursache im Querverkehr.

verbaut ist, und eine Gruppe, der vorher die Notbremsfunktion erklärt wurde. Insgesamt 59 Probanden wurden auf die 3 Gruppen verteilt.<sup>19</sup>

Bezogen auf die Reaktionszeiten ergab sich zwischen den beiden Gruppen mit System kein Unterschied. Die anfängliche Einweisung führt daher zu keiner signifikanten Verhaltens- oder Reaktionszeitanpassung. Im Unterschied zur Gruppe ohne System verkürzte sich die Reaktionszeit beim Bremsen von Ø 670 ms auf Ø 326 ms für die nicht eingewiesene Gruppe, bzw. Ø 314 ms für die eingewiesene Gruppe.<sup>20</sup> Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen mit System ist statistisch nicht signifikant. (Fahrenkrog et al. 2013, A2.3.1.3)

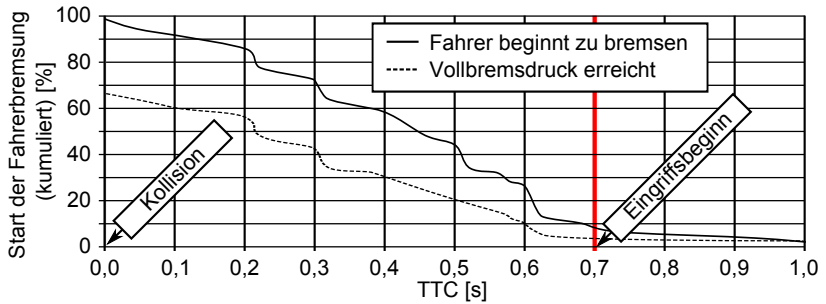
Zwischen der eingewiesenen Gruppe und der nicht eingewiesenen Gruppe ergab sich paradoxerweise die Tendenz, dass die nicht eingewiesenen Fahrer das Gefühl hatten, mehr Kontrolle über das Fahrzeug zu haben. Zudem empfanden sie die Funktion als sicherer. Die Mehrheit der Probanden sah einen Nutzen im Systemeingriff und darin, die Kontrolle an das System abzugeben. Ein kleiner Teil äußerte jedoch die Sorge, dass man das System nicht übersteuern könnte. Da keine der beiden Gruppen mit System signifikant richtig beurteilen konnte, wie lange das System eingegriffen hatte und ob sie es übersteuert hatten, scheint der Punkt der Übergabe nach einem Eingriff noch unzureichend adressiert. Im Gegensatz dazu haben alle Probanden den Beginn des Eingriffs mit Warnton und Bremsnicken richtig erkannt. Viele Probanden schlugen in der anschließenden Befragung eine Sprachinformation vor, die den Fahrer nach dem Ereignis über den Systemeingriff informiert. 97 % der Probanden würden ein entsprechendes System zur Unfallschwereminderung gerne kaufen und sind im Mittel bereit ca. € 600 dafür zu bezahlen. (Fahrenkrog et al. 2013, A2.3.1.3)

---

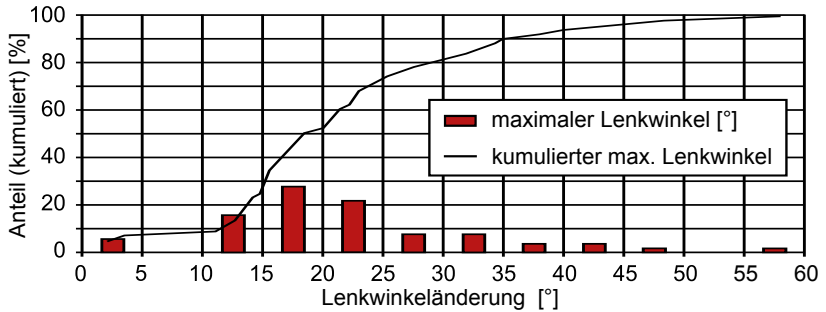
<sup>19</sup>Eine detaillierte Aufschlüsselung der Eigenschaften der Probanden wird in Fahrenkrog et al. (2013, A2.3.1.3) vorgestellt.

<sup>20</sup>Bei den Angaben zur Lenkung konnte nicht nachvollzogen werden, welches Signal wirklich ausgewertet wurde. Dass in allen drei Gruppen eine Lenkreaktion nach 600 ms eintritt, insbesondere in der Gruppe ohne System, erscheint nicht plausibel. Es sind auch keine Angaben über die Stärke der Lenkreaktion angegeben. Daher kann nicht abschließend verifiziert werden, wie diese Angaben zu verstehen sind.

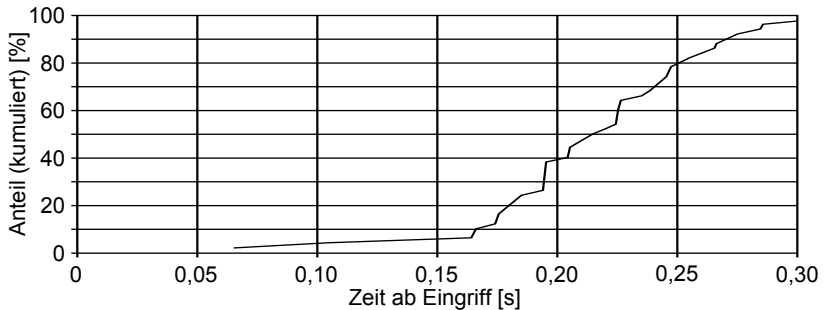




(a) Zeitpunkt, an dem der Fahrer die Bremsung initiiert sowie der Zeitpunkt, an dem der volle Bremsdruck erreicht wird



(b) Maximale Lenkwinkeländerung durch den Eingriff in Gruppen von 5°



(c) Dauer bis die Lenkradbewegung vom Fahrer gestoppt wurde

**Abbildung 5.13:** Fahrerreaktionen der Vehicle in the Loop Versuche nach Heck et al. (2013)



# Kapitel 6

## Berechnung der resultierenden Effizienz

Das Softwaretool 'rateEffect' der Volkswagenforschung dient der Effizienzbewertung aktiver Sicherheitssysteme. Als Grundlage zur Bewertung dienen die Daten der GIDAS bzw. eines Teils der GIDAS, die sogenannte „GIDAS Pre-Crash Matrix“ (Erbsmehl 2009). Die Pre-Crash Matrix enthält für einen Teil der GIDAS-Unfälle eine technische Rekonstruktion des Unfalls. Neben topologischen Informationen zum Unfallort sind zur Simulation insbesondere die plausibilisierten Geschwindigkeitsverläufe der beteiligten Fahrzeuge relevant. Auf Basis dieser Daten kann das potenzielle Wirkfeld der Funktion bestimmt werden. Von Vorteil ist, dass gleichzeitig mehrere Funktionen simuliert werden können, um Wirkfeldüberschneidungen zu berücksichtigen (Anforderung 16, vgl. 3.4.3), da das Wirkfeld der in einem Fahrzeug verbauten Funktionen nicht zwangsläufig die Summe der einzelnen Wirkfelder ist (Jungbluth et al. 2012).

Mithilfe der Unfallrekonstruktions-Software PC-Crash<sup>1</sup> können die im Wirkfeld bestimmten Fälle nachsimuliert werden. Dabei kann das Verhalten der beteiligten Fahrzeuge verändert werden. Zur Effizienzberechnung werden vereinfachte Modelle der betrachteten Funktionen erstellt. Diese Modelle beschreiben das Verhalten der maschinellen Umfeldwahrnehmung, der Funktion und der Aktorik. Basierend auf den Fahrzeugmodellen in PC-Crash können damit die intendierten Eingriffe approximiert werden. Die Verände-

---

<sup>1</sup> Vergleiche z.B. Steffan & Moser (1996).

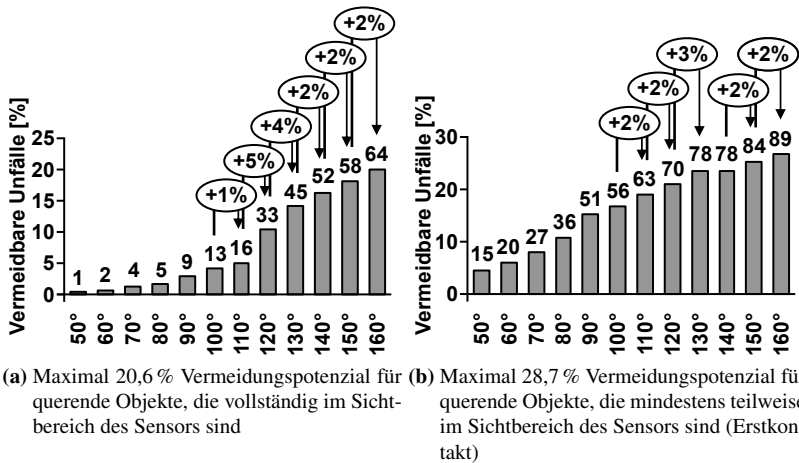
rung des Unfallgeschehens kann dann mithilfe entsprechend zu definierender Maßstäbe bewertet werden.

Zur Effizienzbestimmung der hier vorgestellten Funktion wurden zwei Systembewertungen durchgeführt. In der ersten Simulation waren alle 310 Querverkehrsunfälle der Pre-Crash Matrix enthalten. Ziel dieser Simulation war es zu berechnen, wie viele Unfälle durch einen automatischen Eingriff vollständig hätten vermieden werden können und welcher Sensoröffnungswinkel dafür benötigt würde. Die Unfallvermeidung beim Ausweichen durch eine reine Verzögerung ist, bezogen auf die Unfallschwere, die bestmögliche Lösung einer Gefahrensituation und beschneidet das Wirkfeld einer Funktion zur Unfallfolgenminderung. Zusätzlich vermeidet eine reine Ausweichfunktion die Implikationen bezüglich der Verschiebung der Trefferlagenänderung. Für die Simulation zum Ausweichen wurden keine Plausibilisierungszeiten für die Sensorik verwendet, um ein theoretisches Maximum zu bestimmen.

In der zweiten Simulation wurde das vorgestellte Handlungskonzept vereinfacht simuliert. Dafür konnten nur 253 eindeutige Fälle aus der Pre-Crash Matrix verwendet werden, für die die Trefferlagen eindeutig bestimmbar waren. Ab dem Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit einer Kollision wurde überprüft, ob die Zieltrefferlagen TL 2 oder TL 10 erreicht werden können. Für alle möglichen Fälle wurde ein Eingriff zur Trefferlagenänderung durchgeführt. Das Fahrzeugverhalten entsprach in beiden Simulationen den ermittelten Kennfeldern aus Abschnitt 5.1.1. Die maximale Reichweite des Sensors betrug 20 m. Das querende Objekt wurde erst erkannt, wenn es sich vollständig im Öffnungswinkel befand. Zusätzlich war die Erkennung um 480 ms am Funktionseingang verzögert, um Plausibilisierungs- und Bildverarbeitungszeiten sowie Latenzen zu berücksichtigen. Simuliert wurde zudem eine kontinuierliche Bestimmung der Trefferlage. Geschwindigkeitsänderungen des gestoßenen Fahrzeugs (die in der Pre-Crash Matrix enthalten sind) wurden berücksichtigt und die Eingriffe angepasst oder sogar abgebrochen, wenn sie im Bereich des Vorderwagens blieben. Der Verlauf der Verzögerung entsprach etwas vereinfacht dem Verlauf im Versuchsträger aus Abschnitt 5.1.1.

## 6.1 Unfallvermeidung

Für die Unfallvermeidung wurde eine maximale TTC bei Auslösung von einer Sekunde definiert. Entsprechend können nicht alle Unfälle vermieden werden. Abbildung 6.1a zeigt das Vermeidungspotenzial für verschiedene Öffnungswinkel. Deutlich wird, dass ein Öffnungswinkel unter  $90^\circ$  nur ein geringes Potenzial (ca. 3,2 %) hat. In Abbildung 6.1b ist zusätzlich dargestellt, wie sich das Potenzial erhöht, wenn das Fahrzeug nicht vollständig im Sensoröffnungswinkel sichtbar ist, sondern nur teilweise (Erstkontakt). Radarsensoren können bereits, wenn erst ein Teil des Fahrzeugs im Sensorbereich ist, ein Objekt klassifizieren. Für diese Fahrzeuge existiert dann allerdings keine Längenangabe. Die Angabe der Ergebnisse erfolgt an dieser Stelle, um das maximale Potenzial beispielsweise für die Fusion Radar und Car2X zu zeigen. In Abhängigkeit des Sensors können maximal ca. 20 % bis 28 % der Unfälle vermieden werden.

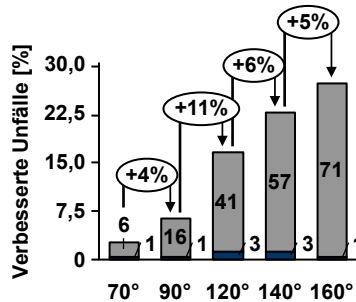


**Abbildung 6.1:** Unfallvermeidungspotenzial für verschiedene Sensoröffnungswinkel. Für jeden Winkel sind die absoluten Fallzahlen über der Säule angegeben ( $n = 310$ ). Ab  $100^\circ$  sind zusätzlich die prozentualen Veränderungen (bezogen auf das gesamte Wirkfeld) angegeben. Die zugrundeliegenden Annahmen sind im Text näher beschrieben.

## 6.2 Unfallfolgenminderung

Abbildung 6.2 zeigt in absoluten Zahlen sowie prozentual die Fälle, bei denen die Funktion auslöst, eine Trefferlagenänderung erfolgreich ist und die Bewertung der resultierenden Unfallschwere positiv ausfällt. Die Bewertung erfolgt durch Vergleich der erreichten Zieltrefferlage und Kollisionsgeschwindigkeit mit der Einteilung des Codebooks aus Tabelle A.8. Bleibt der Trefferlagenbereich unverändert und fällt die Kollision in die gleiche Geschwindigkeitskategorie, wird trotzdem eine Verbesserung angenommen, wenn die Kollisionsgeschwindigkeit geringer ist als ohne Eingriff.

Abbildung 6.2 gibt zusätzlich die Fälle an, bei denen es trotz Eingriffs zu einer Kollision im Bereich der Fahrgastzelle kam. Dabei handelt es sich um



**Abbildung 6.2:** Potenzial der Unfallfolgenminderung für verschiedene Sensoröffnungswinkel. Für jeden Winkel sind die absoluten Fallzahlen in der Säule angegeben ( $n = 253$ ). Zusätzlich sind die prozentualen Veränderungen (bezogen auf das gesamte Wirkfeld) angegeben. Über die Säulen ist die Anzahl der Fälle gelegt, bei denen ein Treffer der Fahrgastzelle nicht vermieden werden konnte. Diese sind mit den jeweiligen Fallzahlen (1 oder 3) angegeben. Bei 160° werden 28 % der Fälle verbessert. Die Bewertung erfolgt anhand Tabelle A.8. Die zugrundeliegenden Annahmen sind im Text näher beschrieben.

Eingriffe, bei denen durch einen Bremseneingriff des gestoßenen Fahrzeugs die Fahrgastzelle nicht komplett vermieden werden konnte. Die Fälle sind jeweils individuell aufgrund der Geschwindigkeitsreduktion als unkritisch bewertet worden.

Tabelle 6.1 zeigt die Mediane der erreichten Geschwindigkeitsreduktion. Der Median über alle Öffnungswinkel beträgt 11,03 km/h. Die abfallende Geschwindigkeitsreduktion mit steigendem Öffnungswinkel erklärt sich durch die kleinere TTC bei Auslösung. Diese wird von größeren Öffnungswinkeln begünstigt. Wie in Abbildung 3.24 gezeigt, haben die stoßenden Fahrzeuge im Vergleich zu den gestoßenen im Durchschnitt eine höhere Ausgangsgeschwindigkeit. Dieses Verhältnis findet sich auch in der Pre-Crash Matrix wieder. Mit größeren Öffnungswinkeln werden daher mehr querende Fahrzeuge mit höherer Ausgangsgeschwindigkeit erfasst. Dadurch reduziert sich insgesamt die TTC bis zur Kollision. Folglich kann weniger Geschwindigkeit abgebaut werden. Deutlich wird dies beim Vergleich mit dem Geschwindig-

**Tabelle 6.1:** Median der Geschwindigkeitsreduktion für die in Abbildung 6.2 dargestellten Fälle

Öffnungswinkel	Median der Geschwindigkeitsreduktion
70°	12,0 km/h
90°	12,9 km/h
120°	11,0 km/h
140°	11,0 km/h
160°	9,7 km/h

keitsabbau einer Sensorkonfiguration – analog zur Unfallvermeidung –, die bereits den Erstkontakt zur Auslösung nutzt. Die Geschwindigkeitsreduktion (für alle Öffnungswinkel), dieser früher auslösenden Systemkonfiguration, liegt mit  $\bar{\emptyset} (10,5 \pm 0,18)$  km/h in der gleichen Größenordnung, die Varianz ist im Vergleich zur vollständigen Erfassung ( $\bar{\emptyset} (10,3 \pm 1,80)$  km/h) deutlich geringer. Die schnellere Erkennung trägt damit, insbesondere im Randbereich des Öffnungswinkels, zu einer früheren Auslösung bei.

## 6.3 Zusammenfassung

Die Zahlen der beiden Fälle sind nicht direkt miteinander vergleichbar. Zum einen liegt die TTC bei Auslösung für die Unfallvermeidung unter der Auslösezeit der Unfallfolgenminderung, die in jeder Situation variiert, 850 ms aber nicht übersteigt. Zum anderen hat die Plausibilisierungszeit einen großen Einfluss. Beispielsweise werden im Falle eines Sensors mit 140° Öffnungswinkel und ohne die 480 ms Plausibilisierungszeit zusätzlich 27 Fälle verbessert. Eine erhöhte Reichweite hat keine Auswirkungen auf die Effizienz.

Entscheidend ist jedoch, dass in beiden Fällen nur ausgelöst wird, wenn entweder der Unfall ganz vermieden oder zu einer vorteilhaften Trefferlage verschoben werden kann. Die Funktionen können daher nur qualitativ verglichen werden. Die Unfallvermeidung soll dabei, aufgrund der früheren Auslösung und der fehlenden Plausibilisierungszeit, für die obere Grenze des Erreichbaren stehen. Vergleicht man die Funktionen bei Auslösung – mit voll-



ständig im Sichtbereich befindlichen Objekten – werden prozentual mehr Fälle (ca. 7 %) von der Unfallvermeidung adressiert. Die Unfallfolgenminderung löst daher in mehr Fällen aus, als die Unfallvermeidung. Es steht also zu vermuten, dass die Wirkfelder sich nicht vollständig überdecken. Dass die Unfallfolgenminderung die Vermeidung sogar überschreitet spricht für die Systemauslegung. Die getroffenen Einschränkungen führen scheinbar nicht zu einem überdurchschnittlichen Effizienzabfall.

Zum Vergleich wurde noch eine reine Notbremsung ohne Berücksichtigung der Trefferlage simuliert. Diese führte in 77 Fällen zu einer Verbesserung der Unfallschwere. Allerdings werden dabei auch 60 Unfälle durch eine Trefferlagenänderung in den Bereich der Fahrgastzelle (aus dem Vorderwagen) verschoben. Die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit war dabei nicht ausreichend, um diese Fälle danach als unkritisch zu bewerten.

Die simulierte Effizienz ist nur bezogen auf die Stichprobe der GIDAS Pre-Crash Matrix gültig.<sup>2</sup> Ein direkter Rückschluss auf das bundesdeutsche Unfallgeschehen ist daher nicht unbedingt möglich. Dafür muss zunächst eine Hochrechnung, wie sie Jungbluth et al. (2012) erwähnen, erfolgen.<sup>3</sup> Die hierfür notwendigen Verfahren befanden sich zur Zeit der Erstellung dieser Arbeit noch in der Entwicklung. Die Höhe der errechneten Werte lässt jedoch die Vermutung zu, dass eine reale Umsetzung einen deutlichen Beitrag zur Steigerung der Verkehrssicherheit leisten könnte.

---

<sup>2</sup>Wichtig ist, dass die Pre-Crash Matrix weder eine Zufallsstichprobe der Querverkehrsunfälle in Deutschland noch eine Zufallsstichprobe der Querverkehrsunfälle der GIDAS Erhebung ist. Es müssen daher die prozentualen Werte auf das bundesdeutsche Unfallgeschehen hochgerechnet werden, bevor diese eine absolute Aussage erlauben. Die Beschränkung auf neue Fahrzeuge (post-NCAP) führt zudem zu einem Bias (bezogen auf neue Fahrzeuge). Eigentlich müsste man das Alter der im Feld befindlichen Fahrzeuge berücksichtigen. Insgesamt problematisch ist, die Hochrechnung auf die beteiligten Personen, aufgrund der ungenauen Angaben zur Belegungsrate der Fahrzeuge. Am Institut für mathematische Stochastik der Technischen Universität Braunschweig wird derzeit eine Methodik entwickelt, um diese Zahlen auf Deutschland oder Europa hochzurechnen.

<sup>3</sup>Niebuhr et al. (2015) stellen ein solches Verfahren vor. Vergleiche auch Labenski et al. (2014).



# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt ein Handlungskonzept zur Unfallschwereminderung im Querverkehr. Erreicht wird diese Unfallschwereminderung hauptsächlich durch einen Bremseingriff des stoßenden Fahrzeugs. Die Trefferlagenänderung kann neben der Bremsung auch durch die Lenkung oder eine Kombination aus beiden erzeugt werden. Im Gegensatz zur Notbremsung im Längsverkehr kommt es bei einer Bremsung im Querverkehr stets zu einer Änderung der Unfallkonstellation. Aufgrund der Geschwindigkeitsreduktion erreicht das stoßende Fahrzeug den Ort der Kollision später. Die zeitliche Änderung führt dazu, dass das gestoßene Fahrzeug entsprechend weiter fährt. Dadurch ändert sich die sogenannte Trefferlage, also der Punkt an dem das gestoßene Fahrzeug getroffen wird.

Für das gestoßene Fahrzeug hat die Trefferlage einen großen Einfluss auf die resultierende medizinische Unfallschwere. Vereinfacht ausgedrückt lässt eine Kollision im Bereich des Vorder- oder Hinterwagens geringere Unfallfolgen erwarten als im Bereich der Fahrgastzelle. Die Untersuchung verschiedener Aspekte der Trefferlagenänderung bildet daher den Schwerpunkt dieser Arbeit.

Das zentrale Leitmotiv der Arbeit ist, die Grundlagen von Handlungskonzepten im Querverkehr im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit zu untersuchen. Die Umsetzung muss dabei einen Beitrag zur Sicherheit leisten, aber auch rechtlichen und ethischen Anforderungen genügen. Das beschriebene Vorgehen und die formulierten Anforderungen sollen eine Orientierung für die zukünftige Entwicklung dieser Funktionen geben.

Grundlegend ist dafür der Entwurf einer geeigneten Verletzungsrisikofunktion zur Beschreibung des Einflusses der Trefferlage und der Geschwindigkeit. Wichtig ist dabei zu beachten, dass die Trefferlage einen Einfluss auf den Geschwindigkeitsabbau in der Kollision hat. In Abhängigkeit der Entfernung zum Schwerpunkt kann der Geschwindigkeitsabbau bei gleicher Kollisionsgeschwindigkeit einen Größenunterschied von 100 % aufweisen. Neben dieser qualitativen Betrachtung steht eine quantitative Untersuchung zur Ermittlung der absoluten Zahlen. Nach den daraus gewonnenen Erkenntnissen sollte eine Kollisionsgeschwindigkeit von über 20 km/h bei Treffern mit der Fahrgastzelle vermieden werden.

Über den zu adressierenden Anteil des Wirkfelds ergeben sich die Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung und verwendete Aktorik. Einen entsprechend großen Öffnungswinkel der Sensorik vorausgesetzt, können auch Unfälle an dicht bebauten oder an zugeparkten Kreuzungen rechtzeitig erkannt werden, um für die dort zugelassenen Höchstgeschwindigkeiten Treffer im Bereich der Fahrgastzelle zu vermeiden.

Für das vorgestellte Handlungskonzept wurde eine Gefahren- und Risikoanalyse mit dem Ziel einer ASIL-Bewertung erarbeitet. Diese kann als Einschätzung zur Definition von Systemgrenzen für die weiterführende Entwicklung verstanden werden. Derzeit stützt sich die Bewertung der funktionalen Sicherheit aktiver Systeme auf die vorhandene passive Sicherheit der Fahrzeuge als Rückfallebene. Dass durch zukünftige Systeme der aktiven Sicherheit die passive Sicherheit der Fahrzeuge reduziert werden könnte setzt daher voraus, dass die aktiven Systeme das Sicherheitspotenzial der passiven Systeme vollständig abdecken und die gleiche Zuverlässigkeit aufweisen. Vor dem Hintergrund der kaum zu überschauenden Eigenheiten der unterschiedlichen Verkehrsdomänen ist die Gleichheit der beiden Wirkfelder auch für die Zukunft fragwürdig.

Im Rahmen der rechtlichen Bewertung stellte sich der vorgeschlagene Lenkeingriff als nicht konform mit der ECE R79 heraus. Für die zukünftige Entwicklung von stärker automatisierten Fahrfunktionen muss daher diskutiert werden, wie diese rechtliche Vorgabe angepasst werden kann. Die Ergebnisse der Probandenbefragung zeigen deutlich, dass ein entsprechender Lenkeingriff im Interesse der Fahrer liegt.

---

Eine Grundlage für diese rechtliche Diskussion kann nur durch gesellschaftlichen Konsens bezüglich der moralischen Implikationen der fortschreitenden Fahrzeugautomatisierung gefunden werden. Für die Trefferlagenänderung im Querverkehr werden verschiedene ethische Ansätze zur Bewertung diskutiert. Als Ergebnis der ethischen Bewertung ist ein Eingriff im Querverkehr zu befürworten. Es muss dabei sichergestellt werden, dass kein am Unfall Beteiligter vorsätzlich benachteiligt wird. Es wurde dargelegt, wieso es gerechtfertigt ist, in unvermeidbaren Querverkehrskollisionen die Verantwortung der Fahrzeugführung an das System abzugeben, um eine gezielte Trefferlagenänderung durchzuführen.

Grundlage für diese geplante Trefferlagenänderung ist ein Verfahren zur situativen Risikobewertung. Vereinfacht zusammengefasst sollte nur eingegriffen werden, wenn durch den Eingriff ein Treffer der Fahrgastzelle vollständig vermieden werden kann. Die Zieltrefferlagen liegen daher außerhalb der Fahrgastzelle und zwar in derart, dass der jeweilige sich näher an der Fahrgastzelle befindliche Längsträger des stoßenden Fahrzeugs die Vorder- oder Hinterachse trifft. Nur für den Fall, dass ein Treffer unvermeidbar im Bereich der Fahrgastzelle liegt und dass sich dieser Treffer hinter dem Schwerpunkt des gestoßenen Fahrzeugs befindet, sollte eine Vollbremsung ausgeführt werden. Ein undifferenzierter Bremseneingriff hält den erarbeiteten rechtlichen und vor allem den ethischen Grundsätzen derzeit nicht stand.

Die Ergebnisse der praktischen Erprobung bestätigen, dass ein System zur risikofunktionsbasierten Verletzungsminimierung von Querverkehrsunfällen prinzipiell umsetzbar ist. Sie zeigen aber auch die bestehenden Probleme auf. Insbesondere die Detektion der Fahrgastzelle ist, ohne weitere Hilfsmittel, eine Herausforderung. Die Anforderung, derartige Details an einem bewegten Objekt im Umfeld zu erkennen, konnte prototypisch unter günstigen Bedingungen in dieser Arbeit erfüllt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Erlangung der Serienreife derartiger Sensoren noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Dies liegt vor allem an der Vielzahl der Fahrzeuge, Situationen und Wetterbedingungen. Eine einfachere und vor allem robustere Lösung scheint es daher zu sein, diese Informationen über Car2X Nachrichten auszutauschen. Für die Steuerung und Regelung des Versuchsträgers lagen viele Erfahrungswerte vor. Diese haben dazu beigetragen die hohe Präzision beim Bremsen zu erreichen. Inwiefern diese Ergebnisse auf andere Fahrzeuge

übertragbar sind, muss zukünftig untersucht werden. Für kombinierte Brems- und Lenkeingriffe konnte keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden. Es ist nicht gelungen, die sehr kurzen Eingriffe im Bereich des Kraftschlussmaximums für unterschiedliche Bedingungen verlässlich zu modellieren. Dabei rückt auch das Zusammenspiel des Systems mit den zahlreichen Funktionen eines Serien-Bremsensteuergeräts in den Fokus. Es erscheint notwendig BAS, ABS, ESC etc. und die entsprechenden Pre-Crash Funktionen in einem integrierten Ansatz der aktiven Fahrzeugsicherheit zu verbinden.

Zur Untersuchung der Fahrerreaktion auf einen Eingriff am Lenkrad (und gleichzeitiger Bremsung) vor einer Querverkehrskollision wurden drei Probandenstudien durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass eine plötzliche Drehung am Lenkrad durch die Mehrheit der Fahrer reflexartig unterbunden wird. Ein kombinierter Eingriff, der eine Drehung des Lenkrads voraussetzt, erscheint nach diesen Ergebnissen nicht realisierbar. Der Bremseneingriff im Zeitraum zwischen 700 ms und 900 ms vor der Kollision wurde von der Mehrzahl der Fahrer als positiv bewertet. Im Vergleich zu Probanden ohne System verbesserten die Eingriffe die Reaktionszeit der Probanden mit System.

Zum Zeitpunkt der Auslösung (Unvermeidbarkeit der Kollision) sind die querenden Fahrzeuge für den Fahrer nahezu blickfeldfüllend. Mehr als eine panische (Brems-) Reaktion ist daher unwahrscheinlich. Anzumerken bleibt, dass selbst geschulte Fahrer in dieser Gefahrensituation vermutlich nicht bedeutend differenzierter als mit einer Vollbremsung handeln können.

Offen bleibt damit die Frage, ob zukünftige Systeme die Bremsanforderung eines Fahrers auch reduzieren können sollten. Dies ist ein wichtiger Punkt, der in der rechtlichen und ethischen Bewertung von Fahrerassistenzsystemen geklärt werden muss. Im Flugzeugbau geht man heute schon soweit bestimmte von Piloten veranlasste Bewegungsänderungen durch die Fly by Wire Systeme zu unterbinden. Ein Computer entscheidet in letzter Instanz, welche Manöver sicher sind und welche nicht. Wann werden wir einem Automobil soweit vertrauen können, dass die bisher stets geforderte Übersteuerbarkeit nicht mehr gegeben sein muss?

Es sind auch weiterführende Ansätze zur Trefferlagenänderung anderer Unfalltypen möglich. Beispielsweise könnte bei Kollisionen mit Bäumen und ohne einen Beifahrer die Intrusion auf die Beifahrerseite verschoben werden. Dafür muss jedoch sichergestellt werden, dass durch die Reibwertdifferen-

---

zen zwischen Fahrbahn und Bankett die Trefferlagenänderung auch erreicht werden kann. Des Weiteren könnten Small overlap Kollisionen entweder zu einer größeren Überdeckung oder sogar zu einer kleineren Überdeckung, die zu einem Abgleiten führt, beeinflusst werden.

Insgesamt geht der Ansatz dieser Arbeit deutlich über frühere Handlungskonzepte hinaus. Dabei wird mit dem Ansatz, dass Bremsen immer die richtige Handlung ist, gebrochen. Die Betrachtung der resultierenden Trefferlage ist bei der Unfallfolgenminderung im Querverkehr zentral. Die Trefferlagenänderung sollte daher zukünftig bei allen Systemen, die auf kreuzende Objekte reagieren, berücksichtigt werden.





# Literaturverzeichnis

- 17/10600 (2012): Unterrichtung durch die Bundesregierung - Bericht über Maßnahmen auf dem Gebiet der Unfallverhütung im Straßenverkehr 2010 und 2011, Drucksache 17/10600 des Deutschen Bundestags vom 3.9.2012.
- 2007/46/EG (2007): Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, ABl. Nr. L 236 vom 9.10.2007.
- 2010/40/EU (2010): Richtlinie 2010/40/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern, ABl. Nr. L 207 vom 6.8.2010.
- 85/374/EWG (1985): Richtlinie 85/374/EWG des Rates vom 25. Juli 1985 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Haftung für fehlerhafte Produkte, ABl. Nr. L 210 vom 7.8.1985.
- Abney, K. (2012): Robotics, Ethical Theory, and Metaethics: A Guide for the Perplexed. In: Lin, P., Abney, K. & Bekey, G. A., Herausgeber, *Robot Ethics - The Ethical and Social Implications of Robotics*, Kap. 3, S. 34 – 54. MIT Press.
- Adams, L. D. (1994): Review of literature on obstacle avoidance maneuvers: braking versus steering. Techn. Ber. UMTRI-94-19, The University of Michigan, Transportation Research Institute.
- Ahn, C., Peng, H. & Tseng, E. (2012): Robust estimation of road friction coefficient using lateral and longitudinal vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Bd. 50, Nr. 6: S. 961 – 985.
- AKTIV (2010): Der Aktiv Ergebnisbericht. Techn. Ber., BMWI-Forschungsinitiative: AKTIV.

- Al-Ghamdi, A. S. & AlGadhi, S. A. (2004): Warning signs as countermeasures to camel-vehicle collisions in Saudi Arabia. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 36, Nr. 5: S. 749 – 760.
- Allen, C. (2002): Calculated morality: Ethical computing in the limit. In: Smit, I. & Lasker, G., Herausgeber, *Cognitive, Emotive and Ethical Aspects of Decision Making and Human Action*, Bd. I, S. 19 – 23. Ontario, Kanada.
- Allen, C., Varner, G. & Zinser, J. (2000): Prolegomena to any future artificial moral agent. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, Bd. 12, Nr. 3: S. 251 – 261.
- Allen, C. & Wallach, W. (2012): Moral Machines: Contradiction in Terms or Abdication of Human Responsibility. In: Lin, P., Abney, K. & Bekey, G. A., Herausgeber, *Robot Ethics - The Ethical and Social Implications of Robotics*, Kap. 4, S. 55 – 68. MIT Press.
- Althoff, M., Stursberg, O. & Buss, M. (2009): Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 10, Nr. 2: S. 299 – 310.
- Ameling, C. (2002): *Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg.
- Anderson, M. & Anderson, S. (2006): Machine ethics. *IEEE Intelligent Systems*, Bd. 21, Nr. 4: S. 10 – 11.
- Andersson, M., Bruzelius, F., Casselgren, J., Gäfvert, M., Hjort, M., Hultén, J., Håbring, F., Klomp, M., Olsson, G., Sjö Dahl, M., Svendenius, J., Woxneryd, S. & Wälivaara, B. (2007): Road Friction Estimation. IVSS Project Report 2004:17750, Intelligent Vehicles Safety Systems.
- Andreone, L., Brignolo, R., Damiani, S., Sommariva, F., Vivo, G. & Marco, S. (2010): SAFESPOT Final Report - Public version. Deliverable D8.1.1, EU-Projekt: SAFESPOT.
- Aoude, G. S., Luders, B. D., Lee, K. K. H., Levine, D. S. & How, J. P. (2010): Threat Assessment Design for Driver Assistance System at Intersections. In: *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 1855 – 1862. Madeira, Portugal.

- Asimov, I. (1942): Runaround. *Astounding Science Fiction*, Bd. 29, Nr. 1: S. 94 – 103.
- Augenstein, J., Bowen, J., Perdeck, E., Singer, M., Stratton, J., Horton, T., Rao, A., Digges, K., Malliaris, A. & Steps, J. (2000a): Injury Patterns in Near-Side Collisions. SAE Technical Paper 2000-01-0634, SAE International.
- Augenstein, J., Perdeck, E., Martin, P., Bowen, J., Stratton, J., Horton, T., Singer, M., Digges, K. & Steps, J. (2000b): Injuries to Restrained Occupants in Far-Side Crashes. *Annals of Advances in Automotive Medicine*, Bd. 44: S. 57 – 66.
- Augenstein, J. S., Bahouth, G. T., Bedewi, N. E., Digges, K. H., Kuznetsov, A. & Perdeck, E. (2004): Development of URGENCY 2.1 for the Prediction of Crash Injury Severity. *Topics in Emergency Medicine*, Bd. 26, Nr. 2: S. 157 – 165.
- Austin, R. (2005): Vehicle Aggressiveness in Real World Crashes. SAE Technical Paper 05-0248, SAE International.
- Azimi, S. R., Bhatia, G., Rajkumar, R. R. & Mudalige, P. (2011): Vehicular Networks for Collision Avoidance at Intersections. SAE Technical Paper 2011-01-0573, SAE International.
- Backer-Grøndahl, A. & Fyhri, A. (2009): Risk perception and transport – a literature review. TØI Report 1008/2009, Institute of Transport Economics, Norwegian Center for Transport Research.
- Bahling, G. S., Bundorf, R. T., Kaspzyk, G. S., Moffatt, E. A., Orlowski, K. F. & Stocke, J. E. (1990): Rollover and Drop Tests - The Influence of Roof Strength on Injury Mechanics Using Belted Dummies. SAE Technical Paper 902314, SAE International.
- Baker, S. P. & O'Neil, B. (1976): The Injury Severity Score: An Update. *The Journal of Trauma*, Bd. 16, Nr. 11: S. 882 – 885.
- Baker, S. P., O'Neil, B., Haddon, W. & Long, W. B. (1974): The Injury Severity Score: A Method for Describing Patients with Multiple Injuries and Evaluating Emergency Care. *The Journal of Trauma*, Bd. 14, Nr. 3: S. 187 – 196.
- Bambrough, R. (2003): *The Philosophy of Aristotle*. Penguin Group.
- Barényi, B. (1952): DE 854157 - Kraftfahrzeug, insbesondere zur Beförderung von Personen.

- Barényi, B. (1969): DE 1405866 A1 - Kraftfahrzeug, insbesondere Personenkraftwagen.
- Barényi, B. (1971): DE 1630313 - Sicherheitslenkung für Kraftfahrzeuge, insbesondere für Personenkraftwagen.
- Bauer, C. (2012): *A Driver-Specific Maneuver Prediction Model Based on Fuzzy Logic*. Dissertation, Freie Universität Berlin.
- Baumgarten, G. (2009): Querdynamische Reibwerterkennung mit Serien-Sensorik. Forschungsbericht 0109, Volkswagen Konzernforschung.
- Bayer, J. L. (1965): US 3178225 - Safety Device for a Seat Occupant.
- Bayly, M., Fildes, B., Regan, M. & Young, K. (2007): Review of crash effectiveness of Intelligent Transport Systems. Deliverable D4.1.1 - D6.2, EU-Projekt: TRACE.
- Beavers, A. F. (2012): Moral Machines and the Threat of Ethical Nihilism. In: Lin, P., Abney, K. & Bekey, G. A., Herausgeber, *Robot Ethics - The Ethical and Social Implications of Robotics*, Kap. 21, S. 333 – 344. MIT Press.
- Becker, R., Belzner, U., Mergenthaler, R. & Heess, G. (1992): DE 4038079 A1 - Fahrzeug mit einem Antiblockierregler.
- Bellin, J. (2011a): *Entwicklung einer Funktion zur Echtzeit-Abschätzung der zu erwartenden Verletzungsschwere im Kollisionsfall und Generierung von Eingangsgrößen für die Regelung des Lenk- und Bremssystems*. Studienarbeit, Technische Universität Braunschweig, betreut durch P. Heck.
- Bellin, J. (2011b): *Erweiterung und Umsetzung eines Verfahrens zur Kollisionsfolgenminderung im Versuchsträger unter Berücksichtigung des Untergrundes sowie überfahrbarer Hindernisse*. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig, betreut durch P. Heck.
- Bentham, J. (1879): *An introduction to the principles of morals and legislation*. Clarendon Press.
- Bewersdorf, C. (2005): *Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehrs: Zur Verantwortlichkeit von Staat, Fahrer, Halter und Hersteller für die Sicherheit des Straßenverkehrs*. Duncker & Humblot.

- Biding, T. & Lind, G. (2002): Intelligent speed adaptation: Results of large-scale trials in Borlänge, Lidköping, Lund and Umeå during the period 1999-2002. Publication 2002:89 E, Vägverket, Swedish National Road Administration.
- BMVBS (2011): Verkehrssicherheitsprogramm 2011. Techn. Ber., Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMVBW (2001): Programm für mehr Sicherheit im Straßenverkehr. Techn. Ber., Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen.
- Bock, T. (2012): Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 8, S. 76 – 83. Vieweg+Teubner Verlag.
- Bock, T., Maurer, M., van Meel, F. & Müller, T. (2008): Vehicle in the Loop – Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 110, Nr. 1: S. 1 – 9.
- Bock, T., Siedersberger, K.-H., Zavrel, M., Breu, A. & Maurer, M. (2005): Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme – Vehicle in the Loop. In: *VDI-Berichte Nr. 1900 - Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung – Mess- und Versuchstechnik*, S. 1 – 16.
- Bradbury, R. (1952): A Sound of Thunder. *Collier's Weekly*, Bd. June 28: S. 20 – 21.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U., Herausgeber (2011): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag.
- Brähler, H. & Rhein, B. (2013): Lastkraftwagen- und Anhängerfahrgestell. In: Hoepke, E. & Breuer, S., Herausgeber, *Nutzfahrzeugtechnik*, 7. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag.
- Brännström, M., Coelingh, E. & Sjöberg, J. (2010): Model-Based Threat Assessment for Avoiding Arbitrary Vehicle Collisions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 11, Nr. 3: S. 658 – 669.
- Brännström, M., Coelingh, E. & Sjöberg, J. (2011): Decision Making on when to Brake and when to Steer to Avoid a Collision. In: *International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident*, S. 1 – 6. Tokio, Japan.

- Braver, E. R., Mitter, E. L., Lund, A. K., Cammisa, M. X., Powell, M. R. & Early, N. (1998): A Photograph-Based Study of the Incidence of Fatal Truck Underride Crashes in Indiana. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 30, Nr. 2: S. 235 – 243.
- Brehme, H. (2008): *Schwere (AIS 3+) Verletzungen von Pkw-Frontinsassen*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- Brehme, H., Hannawald & Zwipp, H. (2010): Ein innovatives Rettungstool zur Einschätzung der Unfallschwere am Unfallort. *Der Unfallchirurg*, Bd. 113, Nr. 5: S. 356 – 359.
- Bürger, H., Rauchecker, F., Sacher, F. & Wielke, B. (1998): *Verkehrsunfall II*. 1. Aufl. MANZ Verlag.
- Brockmann, M., Johansson, E., Rambaldini, A., Hesse, T., Nawrat, F., Larsson, C., Masala, A., Varalda, G., Schieben, A., Fricke, N., Griesche, S., Dziennus, M., Heesen, M., Fjellström, J., Timofeev, M., Suermann, M., Benmimoun, A. & Shah, J. (2012): Results from IWI Evaluation. Deliverable D3.1, EU-Projekt: interactIVe.
- Bromwell, T. (2011): The Beyond Safe solution for developing Intelligent Vehicle Systems. In: *SAE Intelligent Vehicle Systems Symposium - Advancing the Connected Mobility Experience*, Vortrag. Troy, USA.
- Brückner, S. (2005): *Ein ähnlichkeitsmechanisches System zur Prognose des Crashpulses beim PKW-Frontalaufprall*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Brumbelow, M. L., Teoh, E. R., Zuby, D. S. & McCartt, A. T. (2008): Roof Strength and Injury Risk in Rollover Crashes. In: *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury*, S. 49 – 61. Bern, Schweiz.
- Brumbelow, M. L. & Zuby, D. S. (2009): Impact and Injury Patterns in Frontal Crashes of Vehicles with Good Ratings for Frontal Crash Protection. In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, Paper Number 09-0257. Stuttgart.
- Burg, H. (2009): Vermeidbarkeitsbetrachtungen. In: Burg, H. & Moser, A., Herausgeber, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, 1. Aufl., Kap. A8, S. 209 – 218. Vieweg+Teubner Verlag.
- Burg, H. & Zeidler, F. (1980): EES - Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. *Der Verkehrsunfall*, Bd. 18, Nr. 4: S. 75 – 78.

- Busch, S. (2004): *Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- C2C-CC (2007): Car 2 Car Communication Consortium Manifesto. Techn. Ber., Car 2 Car Communication Consortium.
- Campbell, J. L., Kludt, K. & Kiefer, R. J. (2007): Evaluation of In-vehicle Symbols for an Intersection Crash Avoidance System. SAE Technical Paper 2007-01-3518, SAE International.
- Carp, R. W. & Slavin, M. (1970): US 3494671 - Automotive anti-skid control system.
- Carsten, O. & Tate, F. (2005): Intelligent speed adaptation: accident savings and cost-benefit analysis. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 37, Nr. 3: S. 407 – 416.
- Cavanaugh, J. M. (2002): Biomechanics of Thoracic Trauma. In: Nahum, A. M. & Melvin, J. W., Herausgeber, *Accidental Injury - Biomechanics and Prevention*, 2. Aufl., Kap. 16, S. 374 – 404. Springer Verlag.
- Chen, H., Cao, L. & Loganb, D. B. (2011): An innovative method for categorising the contributing factors to intersection crashes using fault tree modelling. *International Journal of Crashworthiness*, Bd. 17, Nr. 2: S. 125 – 139.
- Chen, J., Deutschle, S. & Fuerstenberg, K. (2007): Evaluation Methods and Results of the INTERSAFE Intersection Assistants. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 142 – 147. Istanbul, Türkei.
- Claghorn, E. J. (1985): US 3253672 - Safety-Belt.
- Continental AG (2010): Pressemitteilung: Continental's Emergency Steer Assist helps drivers when there's no time left for braking, 14. Juni 2010.
- Copes, W. S., Champion, H., Sacco, W., Lawnick, M., Keast, S. & Bain, L. (1988): The Injury Severity Score revisited. *The Journal of Trauma*, Bd. 28, Nr. 1: S. 69 – 77.
- Croft, A. C. & Freeman, M. D. (2005): Correlating crash severity with injury risk, injury severity, and long-term symptoms in low velocity motor vehicle collisions. *Medical Science Monitor*, Bd. 11, Nr. 10: S. RA316 – RA321.

- Cummings, J., Osterholt, G., Biller, B. & Calhoun, V. (2010): Updating Generic Crush Stiffness Coefficients for Accident Reconstruction. SAE Technical Paper 2010-01-1581, SAE International.
- Cummings, P. & Grossman, D. C. (2007): Antilock brakes and the risk of driver injury in a crash: A case-control study. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 39, Nr. 5: S. 995 – 1000.
- DeHaven, H. (1942): Mechanical Analysis of Survival in Falls from Heights of Fifty to One Hundred and Fifty Feet. *War Medicine*, Bd. 2: S. 586 – 596.
- Destatis (2012): Verkehrsunfälle. Fachserie 8, Reihe 7, Statistisches Bundesamt.
- Destatis (2013): Verkehr im Überblick. Fachserie 8, Reihe 1.2, Statistisches Bundesamt.
- Dewandre, A. (1927): US 16724 - Power Brake.
- Dietmayer, K., Kirchner, A. & Kämper, N. (2005): Fusionsarchitektur zur Umfeldwahrnehmung. In: Maurer, M. & Stiller, C., Herausgeber, *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, 1. Aufl., Kap. 4, S. 59 – 88. Springer Verlag.
- DIN (1993): Straßenfahrzeuge - Kraftfahrzeugbau - Begriffe von Abmessungen (DIN 70020).
- Dirndorfer, T. (2011): Model-based analysis of sensor noise in predictive passive safety algorithms. In: *International Technical Conference on the Enhanced Safety Of Vehicles*, Paper Number 11-0251. Washington D.C., USA.
- Dischinger, P., Siegelb, J., Hoa, S. & Kuferaa, J. (1998): Effect of change in velocity on the development of medical complications in patients with multisystem trauma sustained in vehicular crashes. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 30, Nr. 6: S. 831 – 837.
- Distner, M., Bengtsson, M., Brodberg, T. & Jakobsson, L. (2009): City Safety - A System Addressing Rear-End Collisions at Low Speeds. In: *International Technical Conference On The Enhanced Safety Of Vehicles*, Paper Number 09-0371. Stuttgart.
- Donges, E. (1992): Das Prinzip der Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem. In: *VDI-Berichte Nr. 948 - Das Mensch-Maschine-System im Verkehr*, keine Seitenangabe, vermutlich nachträglich eingelegt.



- Donnelly, J. P., Griffin, R. L. & McGwin, Jr., N. S. G. (2014): Obesity and vehicle type as risk factors for injury caused by motor vehicle collision. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, Bd. 76, Nr. 4: S. 1116 – 1121.
- Douglas, J. W. & Schafer, T. C. (1971): The Chrysler „Sure-Brake“ - the First Production Four Wheel Antiskid System. SAE Technical Paper 710248, SAE International.
- Dudenredaktion, Herausgeber (1999): *Das große Wörterbuch der deutschen Sprache*. 3. Aufl. Dudenverlag.
- Duhem, P. & Stefanini, A. (1898): Traité élémentaire de mécanique chimique fondée sur la thermodynamique. *Il Nuovo Cimento*, Bd. 6, Nr. 1: S. 227 – 229.
- Ehrenpfordt, I., Kullack, A. & Eggert, F. (2008): ReflektAS – Usage of reflexive driver reactions in ADAS-development. In: *European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, S. 321 – 325. Lyon, Frankreich.
- Eichhorn, O., Kregel, S., Steinmetz, P. & van Slooten, M. (2009): Karosserie und Sicherheitskonzept. *ATZ extra - Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Bd. 14, Nr. 2: S. 22 – 27.
- Eidehall, A. & Petersson, L. (2008): Statistical Threat Assessment for General Road Scenes Using Monte Carlo Sampling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 9, Nr. 1: S. 137 – 147.
- Elslande, P. V., Vatonne, V., Vallet, H., Fouquet, K., Canu, B. & Fournier, J.-Y. (2008): Assessing drivers' needs and contextual constraints for safety functions: A human centred approach from in-depth accident analysis. Deliverable D4.1.5, EU-Projekt: TRACE.
- Elvik, R. (2006): Laws of accident causation. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 38, Nr. 4: S. 742 – 747.
- Elvik, R., Høy, A., Vaa, T. & Sørensen, M. (2009): *The Handbook of Road Safety Measures*. 2. Aufl. Emerald Group Publishing.
- Erbsmehl, C. (2009): Simulation of Real Crashes as a Method for Estimating the Potential Benefits of Advanced Safety Technologies. In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, Paper Number 09-0162. Stuttgart.

- Erbsmehl, C. (2014): *Ein neues dreidimensionales Energie Equivalent Speed (EES)-Modell für Fahrzeuge basierend auf Unfalldaten*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- European Commission (2001): European transport policy for 2010: time to decide. White Paper, European Commission.
- European Commission (2003): European Road Safety Action Programme: Halving the number of road accident victims in the European Union by 2010: A shared responsibility. COM(2003) 311, European Commission.
- European Commission (2010): Towards a European road safety area: policy orientations on road safety 2011-2020. COM(2010) 389, European Commission.
- Evans (1988): Seating Position in Cars and Fatality Risk. *American Journal of Public Health*, Bd. 78, Nr. 11: S. 1456 – 1458.
- Evans, L. (1994): Car size and safety: a review focused on identifying causative factors. In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, Paper Number 94 S4 W 28. München.
- Evans, L. (1995): ABS and Relative Crash Risk Under Different Roadway, Weather, and Other Conditions. SAE Technical Paper 950353, SAE International.
- Evans, L. (1998): Antilock Brake Systems and Risk of Different Types of Crashes in Traffic. SAE Technical Paper 98-S2-O-12, SAE International.
- Evans, L. (2001): Age and Fatality Risk from Similar Severity Impacts. *Journal of Traffic Medicine*, Bd. 29, Nr. 1-2: S. 10 – 19.
- Evans, L. (2004): *Traffic Safety*. Science Serving Society.
- Evans, L. & Frick, M. C. (1993): Mass Ratio and Relative Driver Fatality Risk in Two-vehicle Crashes. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 25, Nr. 2: S. 213 – 224.
- Faerber, E., Gülich, H.-A., Heger, A. & Rüter, G. (1976): Biomechanische Belastungsgrenzen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft 3, Bundesanstalt für Straßenwesen.

- Fahrenkrog, F., Zlocki, A., Dobberstein, J., Schönebeck, S., Garcia, E., Rial, M., Larsson, A., Kaufmann, C., Persson, A., Várhelyi, A., Bakri, T., Premnaath, S., van Noort, M., Willemsen, D., Honka, A., Scholliers, J. & Merilahti, J. (2013): Impact Assessment of Developed Applications – Overall interactive Assessment. Deliverable D7.5, EU-Projekt: interactive.
- Färber, B. & Maurer, M. (2005): Nutzer- und Nutzen-Parameter von Collision Warning und Collision Mitigation Systemen. In: Stiller, C. & Maurer, M., Herausgeber, 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2005, S. 47 – 55. Walting.
- Farmer, C. M., Braveri, E. R. & Mitter, E. L. (1997): Two-vehicle Side Impact Crashes: The Relationship of Vehicle and Crash Characteristics to Injury Severity. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 29, Nr. 3: S. 399 – 406.
- FHWA (2001): National Agenda for Intersection Safety. Techn. Ber. FHWA-SA-02-007, U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration.
- Fildes, B. & Digges, K. (2010): Occupant Protection in Far-Side Crashes. Report no. 294, Monash University - Accident Research Center.
- Fischer, J., Gruden, S., Imhof, E. & Strub, J.-D. (2008): *Grundkurs Ethik*. 2. Aufl. Kohlhammer.
- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K. & Mehlin, M. (2008): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht, Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- Forman, J. L., Lopez-Valdes, F. J., Dennis, N., Kent, R. W., Tanji, H. & Higuchi, K. (2010): An inflatable belt system in the rear seat occupant environment: investigating feasibility and benefit in frontal impact sled tests with a 50th percentile male ATD. *Annals of Advances in Automotive Medicine*, Bd. 54: S. 111 – 126.
- Forschungsinitiative Ko-FAS (2013): Presseinformation: Ko-FAS-Abschlussveranstaltung in Aschaffenburg: Vision vom unfallfreien Verkehr im 21. Jahrhundert, 19. September 2013.
- Forsting, B., Pfadenhauer, D., Hellriegel, E. & Stockmar, C. (1971): DE 1959988 - Fahrzeugsitz mit Seitenschutz, insbesondere für Personenkraftwagen.
- Frampton, R. J., Brown, R., Thomas, P. & Fay, P. (1998): The importance of non struck side occupants in side collisions. *Annals of Advances in Automotive Medicine*, Bd. 42: S. 303 – 320.

- Franke, K. (2014): *Objektdatenfusion von Car2Car und Umfeldsensoren zur Entwicklung intelligenter Frontschutzsysteme*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Franz, J., Hoffmann, R., Vasen, H.-J. & Hillenbrand, M. (1994): Numerical and Experimental Simulation of Different Load Cases in Side Impacts. In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, Paper Number 94 S6 W 27. München.
- Frenz, W., & Casimir-van den Broek, E. (2009): Völkerrechtliche Zulässigkeit von Fahrerassistenzsystemen. *Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht*, Bd. 22, Nr. 11: S. 529 – 576.
- Frost, U. & Keller, H. (1989): Einschätzung einer Zuordnung von Prometheus-Massnahmen und Unfalltypen. Techn. Ber., Technische Universität München.
- Fuerstenberg, K. & Rössler, B. (2005): A new European approach for intersection safety - The EC-project INTERSAFE. In: *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 493 – 504. Porto, Portugal.
- Fujiki, N. (1975): DE 2513517 A1 - Verfahren und Einrichtung zum Abbremsen von Kraftfahrzeugen.
- Gabauer, D. J. & Gabler, H. C. (2008): Can Delta-V be Adjusted with Structural and Occupant Restraint Performance to Improve Prediction of Chest Acceleration? *Annals of Advances in Automotive Medicine*, Bd. 52: S. 165 – 174.
- Gabler, H. C., Digges, K., Fildes, B. N. & Sparke, L. (2005): Side Impact Injury Risk for Belted Far Side Passenger Vehicle Occupants. SAE Technical Paper 2005-01-0287, SAE International.
- Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J. & Vogt, W. (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung - Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 83, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- GDV (1998): Unfalltypen-Katalog - Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps. Techn. Ber., Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. - Institut für Straßenverkehr.

- Gelau, C., Gasser, T. M. & Seeck, A. (2012): Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 3, S. 24 – 32. Vieweg+Teubner Verlag.
- Germane, G. J., Munson, T. S. & Henry, K. C. (2003): Side Impact Motor Vehicle Structural Characteristics From Crash Tests. SAE Technical Paper 2003-01-0495, SAE International.
- Gietelink, O., Ploeg, J., De Schutter, B. & Verhaegen, M. (2003): VEHIL: Test facility for fault management testing of advanced driver assistance systems. In: *ITS World Congress*, S. 13 – 26. Madrid, Spanien.
- Glaser, H. (2006): Fahrwerk und Fahrerassistenz - eine ideale Kombination. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, nur Vortragsunterlagen. Braunschweig.
- Gonter, M., Schwarz, T., Seiffert, U. & Zobel, R. (2011): Fahrzeugsicherheit. In: Braess, H.-H. & Seiffert, U., Herausgeber, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 6. Aufl., Kap. 9, S. 763 – 804. Vieweg+Teubner Verlag.
- Gosselin, J.-P. (1986): How ABS was born. *Automobile Year*, Bd. 34: S. 57 – 64.
- Grabner, J. & Nothaft, R. (2006): *Konstruieren von Pkw-Karosserien*. 3. Aufl. Springer Verlag.
- Graf, U. & Henning, H.-J. (1987): *Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik*. 3. Aufl. Springer Verlag.
- Greene, J. E. (1977): Computer Simulation of Car-To-Car Collisions. SAE Technical Paper 770015, SAE International.
- Griffin, R., Huisinigh, C., McGwin, Jr., G. & Reiff, D. (2012): Association between side-impact airbag deployment and risk of injury: A matched cohort study using the CIREN and the NASS-CDS. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, Bd. 73, Nr. 4: S. 914 – 918.
- Griswold, R. W. & DeHaven, H. (1955): US 2710649 - Combination Shoulder and Lap Safety Belt.
- Grünecker, A., Stockmair, W., Schumann, K., Jakob, P., Bezold, G., Meister, W., Hilgers, H., Meyer-Plath, H., Ehnold, A. & Schuster, T. (1975): DE 3820589 A1 - Steuersystem für ein selbstgesteuertes Kraftfahrzeug oder dgl.

- Gründl, M. (2005): *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Universität Regensburg.
- Grunert, C. (2013): *Markierungslicht und Lichtsperre - Unterstützung des Fahrers bei Wahrnehmung und Handlungsauswahl in kritischen Situationen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Gstalter, H. (1983): *Der Verkehrskonflikt als Kenngröße zur Beurteilung von Verkehrsabläufen und Verkehrsanlagen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Haag, K.-D. & Roth, G. (2003): DE 10351754 A1 - Gurtstrafferaggregat mit das Gurtschloss verstellender reversibler Spannvorrichtung.
- Habermas, J. (1991): Was macht eine Lebensform rational? In: *Erläuterungen zur Diskursethik*, 1. Aufl., Kap. 2, S. 31 – 48. Suhrkamp.
- Hacker, W. (2005): *Allgemeine Arbeitspsychologie - Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit*. 2. Aufl. Verlag Hans Huber.
- Haddon, Jr., W., Suchman, E. A. & Klein, D. (1964): *Accident Research - Methods and Approaches*. Harper & Row Publishers.
- Haja, A., Schwitters, F., Prausse, C., Lambert, G., Freese, M. & Katzwinkel, R. (2009): Demokratisierung der Fahrerassistenz. In: *VDI-Berichte Nr. 2075 - Elektronik im Kraftfahrzeug*, S. 553 – 562.
- Hallot, M. P. (1927): No. 628.744 - Régulateur pour freins de véhicules particulièrement applicable aux véhicules automobiles.
- Harms, P., Renouf, M., Thomas, P. & Bradford, M. (1987): Injuries to Restrained Car Occupants; What are the Outstanding Problems? In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, S. 183 – 201. Washington, D.C, USA.
- Hassan, A. M., Morris, A. P., Mackay, M. & Haland, Y. (1995): Injury Severity in Side Impacts - Implications for Side Impact Airbag. In: *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury*, S. 353 – 364. Brunnen, Schweiz.
- Hautzinger, H., Pfeiffer, M. & Schnidt, J. (2005): Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort. Schlussbericht FE 82.221/2002, Bundesanstalt für Straßenwesen.

- Hautzinger, H., Roth, J.-J., Bild, K., und J. Sliwinski, C. F., Lohre, D. & und I. Holder, C. D. (2011): Wissenschaftliche Begleitung der Aktion Fahrerassistenzsysteme „SICHER. FÜR DICH. FÜR MICH.“. Schlussbericht, BG Verkehr, BGL und KRAVAG-Versicherungen.
- Heck, P. (2009): *Entwicklung erster Funktionalitäten des Fahrentscheidermoduls für das autonome Straßenfahrzeug Leonie*. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- Heck, P., Bellin, J., Matoušek, M., Wonneberger, S., Sychrovský, O., Šára, R. & Maurer, M. (2013): Collision Mitigation for Crossing Traffic in Urban Scenarios. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 559 – 566. Gold Coast, Australien.
- Heck, P., Gonter, M., Bellin, J. & Maurer, M. (2012a): Beitrag zur integralen Sicherheit durch ein situativ adaptiertes Entscheidungsverfahren. In: 28. *VDI-VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*, keine Seitenangabe, auf CD. Wolfsburg.
- Heck, P. & Junge, M. (2014a): DE 102012017628 A1 - Verfahren zur Steuerung eines Fahrzeugs und Fahrerassistenzsystem.
- Heck, P. & Junge, M. (2014b): WO 2014/037245 A1 - Method for Controlling a Vehicle and Vehicle Assistance System.
- Heck, P. & Junge, M. (2016): Aktenzeichen 102014218208.5 - Verfahren zum Betreiben eines ersten Kraftfahrzeugs bei Erkennen eines unvermeidbaren Seitenaufpralls eines zweiten Kraftfahrzeugs auf das erste Kraftfahrzeug.
- Heck, P., Junge, M. & Wohllebe, T. (2014a): DE102012021004 A1 - Verfahren und Vorrichtung zum Reduzieren von medizinischen Unfallfolgen bei unvermeidbaren Unfällen im Querverkehr.
- Heck, P., Junge, M. & Wohllebe, T. (2014b): EP 2724910 A1 - Verfahren und Vorrichtung zum Reduzieren von medizinischen Unfallfolgen bei unvermeidbaren Unfällen im Querverkehr.
- Heck, P., Wonneberger, S., Wohllebe, T., Wykowski, E., Gonter, M., Šára, R. & Matoušek, M. (2012b): Activities within interactive Collision Mitigation for Crossing Traffic. In: *ITS World Congress*, keine Seitenangabe, auf interner Veranstaltungswebseite. Wien, Österreich.

- Heck, P. & Wykowski, E. (2013): DE 102011120778 A1 - Verfahren und Vorrichtung zum Schutz eines Fahrers eines Kraftfahrzeugs.
- Hecker, A. (2004): Barrichello kommt in Indianapolis nur beinahe an Michael Schumacher heran: Achter Sieg im neunten Rennen für den Weltmeister Crash von Ralf Schumacher endet glimpflich. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Ausgabe 141 vom 21.06.2004: S. 30.
- Heibel, H. (1994): DE 4309850 A1 - Verfahren und Vorrichtung zum Regeln eines Bremsdruckes mit einem Bremskraftverstaerker.
- Heinrich, S., Pöppel-Decker, M., Schönebeck, S. & Ulitzsch, M. (2010): Unfallgeschehen auf Landstraßen - Eine Auswertung der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 209, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Henning, P. (2010): Die Fahrzeugsicherheit - Integrale Sicherheit. *ATZ extra - Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Bd. 15, Nr. 3: S. 56 – 59.
- Hentschel, P., König, P. & Dauer, P., Herausgeber (2011): *Straßenverkehrsrecht*. 41. Aufl. Verlag C. H. Beck.
- Herrmann, S. (2013): *Kollisionswarnung im urbanen Straßenverkehr auf Basis einer probabilistischen Situationsanalyse*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Herrmann, S., Beenken, M. & Schroven, F. (2012): Situationsanalyse mit Hilfe wahr-scheinlichkeitsbehafteter Aufenthaltsgebiete für Fahrerassistenzsysteme in urbaner Fahrumgebung. In: *safe.tech 2012*, keine Seitenangabe, auf CD. München.
- Herrmann, S. & Schroven, F. (2012): Fahrerabsichtserkennung für städtische Fahrerassistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung im Kreuzungsbereich. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S. 478 – 497. Braunschweig.
- Hesse, T., Johansson, E., Brockmann, M., Rambaldini, A., Allgaier, A., Esberg, I., Fricke, N., Kelsch, J., Larsson, C., Larsson, P., Masala, A., Mazzi, I., Nawrat, F., Schieben, A. & Silvagni, S. (2012): IWI Strategies. Deliverable D3.2, EU-Projekt: interactIVe.



- Heudorfer, B. & Meißner, D. (2008): Aktiver Eingriff in passive Systeme: Von passiver Sicherheit zu sicherem Fahren. In: Schindler, V. & Sievers, I., Herausgeber, *Forschung für das Auto von morgen*, 1. Aufl., Kap. III-1, S. 215 – 238. Springer Verlag.
- Höffe, O., Herausgeber (1997): *Lexikon der Ethik*. 5. Aufl. Verlag C. H. Beck.
- Hilborn, R. C. (2004): Sea gulls, butterflies, and grasshoppers: A brief history of the butterfly effect in nonlinear dynamics. *American Journal of Physics*, Bd. 72, Nr. 4: S. 425 – 427.
- Hiramatsu, M., Hagino, M. & Inoue, H. (2008): A Study of a Method for Predicting the Risk of Crossing-Collisions at Intersection. SAE Technical Paper 2008-01-0524, SAE International.
- HLDI (2011): Volvo City Safety Loss Experience - Initial Results. Bulletin Vol. 28, No. 6, Highway Loss Data Institute.
- Hoffmann, J. & Gayko, J. (2012): Fahrerwarnelemente. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 24, S. 343 – 354. Vieweg+Teubner Verlag.
- Homann, K. (2005): Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand. In: Maurer, M. & Stiller, C., Herausgeber, *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, 1. Aufl., Kap. 11, S. 239 – 244. Springer Verlag.
- Hoppe, M., Zobel, R. & Schlag, B. (2007): Identifikation von Einflussgrößen auf Verkehrsunfälle als Grundlage für die Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Kreuzungsunfällen. In: *VDI-Berichte Nr. 2015 - Fahrer im 21. Jahrhundert*, S. 121 –137.
- Huang, Q., Miller, R., MacNeille, P., Roman, G.-C. & DiMeo, D. (2002): Development of a Peer-to-Peer CollisionWarning System. *Ford Technical Journal*, Bd. 5, Nr. 2, keine Seitenangabe.
- Hummel, T., Kühn, M., Bende, J. & Lang, A. (2011): Fahrerassistenzsysteme - Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadengeschehens der Deutschen Versicherer. Forschungsbericht FS 03, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. - Unfallforschung der Versicherer.

- IIHS (2011): Avoid Crashes. Status Report Vol. 46, No. 6, Insurance Institute for Highway Safety.
- IIHS (2012): Estimated Times of Arrival. Status Report Vol. 47, No. 1, Insurance Institute for Highway Safety.
- INTERSAFE-2 (2011): Final Report. Deliverable D1.2, EU-Projekt: INTERSAFE-2.
- INVENT (2003): Vorausschauende Aktive Sicherheit VAS. Kurzbeschreibung zum Teilprojekt, BMBF Projekt: INVENT.
- Isermann, R., Hohm, A., Mannale, R., Schiele, B., Schmitt, K., Winner, H. & Wojek, C. (2012): Antikollisionssystem PRORETA - Integrierte Lösung zur Vermeidung von Überholunfällen. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 41, S. 632 – 640. Vieweg+Teubner Verlag.
- ISO (1977): Road vehicles - Types - Terms and definitions (ISO 3833 : 1977).
- ISO (1997): Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions (ISO 5725-1 : 1997).
- ISO (2011a): Intelligent transport systems - Forward vehicle collision mitigation systems - Operation, performance and verification requirements (ISO 22839 : 2011).
- ISO (2011b): Road vehicles - Functional safety (ISO 26262 : 2011).
- ISO (2013): Intelligent transport systems - Forward vehicle collision warning systems - Performance requirements and test procedures (ISO 15623 : 2013).
- Jansson, J., Johansson, J. & Gustafsson, F. (2002): Decision Making for Collision Avoidance Systems. SAE Technical Paper 2002-01-0403, SAE International.
- Johannsen, G. (1993): *Mensch-Maschine-Systeme*. Springer Verlag.
- Johannsen, H. (2013): *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion - Grundlagen der Unfallaufklärung*. 3. Aufl. Springer Vieweg Verlag.
- Johnson, A. (2000): *Engineering Culture and the Production of Knowledge: An Intellectual History of Anti-lock Braking Systems*. Dissertation, Princeton University, USA.

- Johnson, A. (2009): *Hitting the Brakes: engineering design and the production of knowledge*. Duke University Press.
- Jungbluth, A., Kohsiek, A., Wille, J. M. & Zatloukal, M. (2012): rateEFFECT - Entwicklung eines Werkzeugs zur Effizienzbewertung aktiver Sicherheitssysteme. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S. 292 – 315. Braunschweig.
- Junge, M. (2012): Grafik „Sicherheitspotential aktiver und passiver Systeme“. modifiziert und ergänzt nach G. Uerz und C. Krebs-Hartmann aus „Mobilität 2030“, Volkswagen AG 2012, Seite 49.
- Junge, M. (2014): Einbeziehung der passiven Sicherheit bei der Bewertung aktiver FAS-Systeme. Version 4.50 fork, 5. Februar 2014, unveröffentlicher Bericht der Volkswagen AG .
- Kahane, C. J. (1989): An evaluation of center high mounted stop lamps based on 1987 data. Techn. Ber. DOT HS 807 442, U.S. Department of Transportation - National Highway Traffic Safety Administration.
- Kamal, M. M. & Lin, K.-H. (1982): Collision Simulation. In: Kamal, M. M. & Wolf, J. A., Herausgeber, *Modern Automotive Structural Analysis*, Kap. 9, S. 316 – 355. Van Nostrand Reinhold Company.
- Kämpchen, N., Schiele, B. & Dietmayer, K. (2009): Situation Assessment for and Autonomous Emergency Brake for Arbitrary Vehicle-to-Vehicle Collision Scenarios. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 10, Nr. 4: S. 678 – 687.
- Kant, I. (1791): *Grundlagen zur Metaphysik der Sitten*. ohne Ort und Verlag.
- Karrenberg, S. (2008): *Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Katz, B. (1923): US 1471168 - Headrest for Automobile Seats and the Like.
- Kavalir, J. & Studnicka, M. (1975): DE 2362071 A1 - Drahtloses Notrufsystem.

- KBA (2011): Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Dezember 2011 nach Segmenten. Tabellarische Angabe im Internet, Kraftfahrtbundesamt. Stand Oktober 2012.  
Veröffentlicht im Internet: [http://www.kba.de/cln\\_032/nn\\_330292/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2011/201112GV1monatlich/201112\\_\\_n\\_\\_top3\\_\\_teil1\\_\\_tabelle.html](http://www.kba.de/cln_032/nn_330292/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2011/201112GV1monatlich/201112__n__top3__teil1__tabelle.html)
- Kent, R. (2001): *Dynamic Response of the Thorax: Restraint-Specific Injury Prediction and Constitutive Description*. Dissertation, University of Virginia, USA.
- Kent, R., Lopez-Valdes, F. J., Dennis, N. J., Lessley, D., Forman, J., Higuchi, K., Tanji, H., Ato, T., Kameyoshi, H. & Arbogast, K. (2011): Assessment of a Three-Point Restraint System with a Pre-tensioned Lap Belt and an Inflatable, Force-Limited Shoulder Belt. *Stapp Car Crash Journal*, Bd. 55: S. 141 – 159.
- Kent, R. & Patrie, J. (2004): Chest deflection tolerance to blunt anterior loading is sensitive to age but not load distribution. *Forensic Science International*, Bd. 149, Nr. 2-3: S. 121 – 128.
- Kent, R., Stacey, S. & Parenteau, C. (2008): Dynamic Pinch Tolerance of the Phalanges and Interphalangeal Joints. *Traffic Injury Prevention*, Bd. 9, Nr. 1: S. 83 – 88.
- Kent, R., Viano, D. C. & Crandall, J. (2005): The Field Performance of Frontal Air Bags: A Review of the Literature. *Traffic Injury Prevention*, Bd. 6, Nr. 1: S. 1 – 23.
- Kiefer, E., Loth, G., Scholz, H. & Seiffert, U. (1976): Aufgaben und Möglichkeiten des Insassenschutzes bei Unfällen. In: *Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) Nr. 22 - Auto und Sicherheit*, S. 53 – 72.
- Kiesewetter, W., Klinker, W. & Steiner, W. (1997): Der neue Brake Assist von Mercedes-Benz - Aktive Fahrerunterstützung in Notsituationen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 99, Nr. 6: S. 330 – 339.
- Kim, J., Lee, J. & Kim, E. (2012): Technical Feasibility Study on Avoidance or Mitigation of Side Collisions at Intersections. SAE Technical Paper 2012-01-0090, SAE International.
- Klanner, F. (2008): *Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

- Klindt, T. & Handorn, B. (2010): Haftung eines Herstellers für Konstruktions- und Instruktionsfehler. *Neue Juristische Wochenschrift*, Bd. 63, Nr. 16: S. 1105 – 1108.
- Klößner, J. H. (1991): Impact of Prometheus Functions on Traffic Safety. In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, Paper Number S4-O-02. Paris, Frankreich.
- Knaup, J. (2012): *Kooperative Umfeldwahrnehmung für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel urbaner Kreuzungsassistenten*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Knaup, J. & Homeier, K. (2010): RoadGraph - Graph based environmental modelling and function independent situation analysis for driver assistance systems. In: *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 428 – 432. Madeira, Portugal.
- Kompaß, K. (2008): Fahrerassistenzsysteme der Zukunft - auf dem Weg zum autonomen Pkw? In: Schindler, V., Herausgeber, *Forschung für das Auto von Morgen*, 1. Aufl., Kap. 7, S. 261 – 285. Springer Verlag.
- Kopischke, S. (2000): *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Kraiss, K.-F. (1998): Benutzergerechte Automatisierung - Grundlagen und Realisierungskonzepte. *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 10, Nr. 46: S. 457 – 467.
- Kraiss, K.-F. & Hamacher, N. (2001): Concepts of user centered automation. *Aerospace Science Technology*, Bd. 5, Nr. 8: S. 505 – 510.
- Kramer, F. (2009): *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. 3. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag.
- Kramer, F. (2012): Die integrale Sicherheit. In: Kramer, F., Herausgeber, *Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen*, 4. Aufl., Kap. 1, S. 1 – 9. Vieweg+Teubner Verlag.
- Kreuzinger, T. (2005): *Fahrzeug-Kompatibilität im Seitenaufprall*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen.
- Kroll, H.-M., Buschardt, B., Schmidt, K. & Lienkamp, M. (2014): Utilization of customer-relevant driving behavior for reliable friction potential estimation by scaling nonlinear tyre models. In: Reuss, H.-C. & Wiedemann, J., Herausgeber, 14.

- Internationales Stuttgarter Symposium „Automobil und Motorentechnik,,*, S. 1003 – 1017. Stuttgart.
- Kruskal, W. H. & Wallis, W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, Bd. 47, Nr. 260: S. 583 – 621.
- Kruskal, W. H. & Wallis, W. A. (1953): Errata: Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, Bd. 48, Nr. 264: S. 907 – 911.
- Kullgren, A. (1998): *Validity and Reliability of Vehicle Collision Data: Crash Pulse Recorders for Impact Severity and Injury Risk Assessments in Real-life Frontal Impacts*. Dissertation, Karolinska Institute Stockholm, Schweden.
- Kullgren, A. (2008): Dose-Response Models and EDR Data for Assessment of Injury Risk and Effectiveness of Safety Systems. In: *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury*, S. 3 – 14. Bern, Schweiz.
- Kulowski, J. (1960): *Crash Injuries - The integrated medical aspects of automobile injuries and deaths*. Charles C Thomas Publisher.
- Kunert, U., Radke, S., Chlond, B. & Kagerbauer, M. (2012): Auto-Mobilität: Fahrleistungen steigen 2011 weiter. DIW Wochenbericht Nr. 47.2012, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung.
- Kurz, M. (2010): *Konzept für einen Längsträger mit degressiver Kennung*. Studienarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- Labenski, V., Dobberstein, J. & Schlender, T. (2014): UR:BAN KA-WER: Accident Data Analysis and Pre-Crash Simulation for the Configuration and Assessment of Driver Assistance Systems in Urban Scenarios. In: *Expert Symposium on Accident Research*, keine Seitenangabe, nur digital. Hannover.
- Lages, U. S. (2000): *Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg.
- Lee, E. L., Lee, P. J., Erickson, M. S. & Hayes, W. C. (2014): Increase in Vehicle Front, Rear and Side Stiffness Coefficients in the Past Twenty Years Necessitates New Representative Database. SAE Technical Paper 2014-01-0351, SAE International.

- Lefèvre, S., Laugier, C. & Ibañez-Guzmán, J. (2012): Risk Assessment at Road Intersections: Comparing Intention and Expectation. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 165 – 171. Alcalá de Henares, Spanien.
- Leiber, H. & Limpert, W. D. (1968): Ein neuer Weg zur Verhütung des Blockierens von Kraftfahrzeugrädern durch adaptive Bremsschlupfregelung. *Automobil Industrie*, Bd. 16, Nr. 2: S. 65 – 70.
- Lerner, M., Schepers, A., Pöppel-Decker, M., Leipnitz, C. & Fitschen, A. (2013): Voraussichtliche Entwicklung von Unfallzahlen und Jahresfahrleistungen in Deutschland. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, Bd. 59, Nr. 1: S. 40 – 51.
- Levine, R. S. (2002): Injury to the Extremities. In: Nahum, A. M. & Melvin, J. W., Herausgeber, *Accidental Injury*, 2. Aufl., Kap. 19, S. 491 – 522. Springer Verlag.
- Lewis, D. J. (1974): US 3841654 - Vehicle Safety System.
- Liebner, M., Klanner, F., Baumann, M. & Stiller, C. R. C. (2013): Velocity-Based Driver Intent Inference at Urban Intersections in the Presence of Preceding Vehicles. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Bd. 5, Nr. 2: S. 10 – 21.
- Lin, K.-H., Kamal, M. M. & Justusson, J. W. (1975): Effect of Vehicle Mix on Two-Car Head-On Impact. SAE Technical Paper 750117, SAE International.
- Lin, P. (2013): The Ethics of Saving Lives With Autonomous Cars Is Far Murkier Than You Think. *Wired*, Online Magazin. Stand Juli 2013.  
Veröffentlicht im Internet: <http://www.wired.com/2013/07/the-surprising-ethics-of-robot-cars/>
- Lin, P. (2014): The Robot Car of Tomorrow May Just Be Programmed to Hit You. *Wired*, Online Magazin. Stand Mai 2014.  
Veröffentlicht im Internet: <http://www.wired.com/2014/05/the-robot-car-of-tomorrow-might-just-be-programmed-to-hit-you/>
- Lin, P., Abney, K. & Bekey, G. A., Herausgeber (2012): *Robot Ethics - The Ethical and Social Implications of Robotics*. MIT Press.
- Linderer, W. (1951): DE 896312 - Einrichtung zum Schutze von in Fahrzeugen befindlichen Personen gegen Verletzungen bei Zusammenstößen.
- Lindner, F., Kressel, U. & Kaelberer, S. (2004): Robust recognition of traffic signals. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 49 – 53. Parma, Italien.

- Liu, T., jun Chen, J., jun Bai, X., shou Zheng, G. & Gao, W. (2013): The effect of obesity on outcomes in trauma patients: A meta-analysis. *Injury, International Journal of the Care of the Injured*, Bd. 44, Nr. 9: S. 1145 – 1152.
- Lorenz, E. N. (1963): Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Bd. 20, Nr. 2: S. 130 – 141.
- Lorenz, E. N. (1972): Predictability: does the flap of a butterfly's wing in Brazil set off a tornado in Texas? In: *139th Meeting of the American Association for the Advancement of Science*, nur Vortragsmanuskript. Cambridge, USA.
- Lu, H., Andreen, M., Faust, D., Furton, L., Holcombe, S., Kohoyda-Inglis, C., Putala, B., Yee, J. & Wang, S. (2011): Safety Belt and Occupant Factors Influencing Thoracic & Upper Abdominal Injuries in Frontal Crashes. SAE Technical Paper 2011-01-1129, SAE International.
- Lucas, B., Held, R., Duba, G.-P., Maurer, M., Klar, M. & Freundt, D. (2008): Front-sensorsystem mit Doppel Long Range Radar. In: Stiller, C. & Maurer, M., Herausgeber, *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2008*, S. 1 – 11. Walting.
- Lutz, L. S., Tang, T. & Lienkamp, M. (2013): Analyse der rechtlichen Situation von teleoperierten (und autonomen) Fahrzeugen. *Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht*, Bd. 26, Nr. 2: S. 57 – 63.
- MacLennan, C. A. (1988): Accident to Crash: The Auto Industry and the Politics of Injury. *Medical Anthropology Quarterly*, Bd. 2, Nr. 3: S. 233 – 250.
- MacLennan, P. A., Ashwandera, W. S., Griffin, R., McGwin Jr., G. & III, L. W. R. (2008): Injury risks between first- and second-generation airbags in frontal motor vehicle collisions. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 40, Nr. 4: S. 1371 – 1374.
- Madison, R. H. & Riordan, H. E. (1969): Evolution of the Sure-Track Brake System. SAE Technical Paper 690213, SAE International.
- Mages, M., Hopstock, M. & Klanner, F. (2012): Kreuzungsassistentz. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 37, S. 572 – 581. Vieweg+Teubner Verlag.
- Mages, M., Winner, H. & Hopstock, M. (2007): Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistentz - Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen. In: *VDI-Berichte Nr. 2015 - Fahrer im 21. Jahrhundert*, S. 61 – 73.



- Maier, R., Ahrens, G.-A., Aurich, A. P., Bartz, C., Schiller, C., Winkler, C. & Wittwer, R. (2012): Entwicklung der Verkehrssicherheit und ihrer Rahmenbedingungen bis 2015/2020. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 224, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Mäkinen, T., Alessandretti, G., Kanstrup, L., Sjögren, A., Hesse, T., Saroldi, A., Appendorf, N., Heck, P., Wykowski, E., Stählin, U., Westervall, L., Suermann, M., Loewenau, J., Fagerlind, H., Bilen, O. B., Lidberg, M., Shah, J., Olsson, C., Englund, T. & Engström, J. (2010): Use Cases and Requirements. Deliverable D1.5, EU-Projekt: interactIVe.
- Malaterre, G., Ferrandez, F., Fleury, D. & Lechner, D. (1988): Decision making in emergency situations. *Ergonomics*, Bd. 31, Nr. 4: S. 643 – 645.
- Malta, L., Aust, M. L., Faber, F., Metz, B., Pierre, G. S. & Benmimoun, M. (2012): Final results: Impacts on traffic safety. Deliverable D6.4, EU-Projekt: euroFOT.
- Mandell, S. P., Mack, C. D. & Bulger, E. M. (2010): Motor vehicle mismatch: a national perspective. *Traffic Injury Prevention*, Bd. 16, Nr. 5: S. 309 – 314.
- Marquard, E. (1962): Zur Mechanik des Zusammenstoßes von Fahrzeugen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 64, Nr. 5: S. 141 – 148.
- Mary, B. S. (1983): Finding Aid to the Hugh DeHaven, Phd (1895-1980) Papers. Techn. Ber., Medical Center Archives of Newyork-Presbyterian/Weill Cornell.
- Matthaei, R. & Maurer, M. (2015): Autonomous Driving – A Top Down-Approach. *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 63, Nr. 3: S. 155–167.
- Maurer, M. (2000): *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Maurer, M. (2012a): Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 5, S. 43 – 54. Vieweg+Teubner Verlag.
- Maurer, M. (2012b): Forward Collision Warning and Avoidance. In: Eskandarian, A., Herausgeber, *Handbook of Intelligent Vehicles*, Bd. 2, 1. Aufl., Kap. 25, S. 659 – 685. Springer Verlag.

- Maurer, M. (2013): Funktionale Systemarchitektur, Unterlagen zur Vorlesung "Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug", Technische Universität Braunschweig, Sommersemester 2013.
- Maus, A. & Junge, M. (2013): Vertrauen in Fahrerassistenzsysteme – Gestaltung von Fahrerassistenz und Vertrauenskalibrierung. In: Brandenburg, E., Doria, L., Gross, A., Günzler, T. & Smieszek, H., Herausgeber, *10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*, S. 222 – 229. Berlin.
- Mayrose, J. & Priya, A. (2008): The safest seat: Effect of seating position on occupant mortality. *Journal of Safety Research*, Bd. 39, Nr. 4: S. 433 – 436.
- Mazzae, E. N., Baldwin, G. H. S. & McGehee, D. V. (1999): Driver Crash Avoidance Behavior with ABS in an Intersection Incursion Scenario on the Iowa Driving Simulator. SAE Technical Paper 1999-01-1290, SAE International.
- McGwin, Jr., G. & Brown, D. B. (1999): Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 31, Nr. 3: S. 181 – 198.
- McGwin, Jr., G., Metzger, J., Alonso, J. & Rue III., L. W. (2003a): The association between occupant restraint systems and risk of injury in frontal motor vehicle collisions. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, Bd. 54, Nr. 6: S. 1182 – 1187.
- McGwin, Jr., G., Metzger, J., Porterfield, J. R., Moran, S. G. & Rue III., L. W. (2003b): Association Between Side Air Bags and Risk of Injury in Motor Vehicle Collisions With Near-Side Impact. *The Journal of TRAUMA Injury, Infection, and Critical Care*, Bd. 55, Nr. 3: S. 430 – 436.
- McGwin, Jr., G., Metzger, J. & Rue III., L. W. (2004): The Influence of Side Airbags on the Risk of Head and Thoracic Injury after Motor Vehicle Collisions. *The Journal of TRAUMA Injury, Infection, and Critical Care*, Bd. 56, Nr. 3: S. 512 – 517.
- Meier, A., Gonter, M. & Kruse, R. (2014a): Precrash Classification of Car Accidents for Improved Occupant Safety Systems. In: *International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering*, keine Seitenangabe, auf CD. Bremen.

- Meier, A., Gonter, M. & Kruse, R. (2014b): Symbolic Regression for Precrash Accident Severity Prediction. In: Polycarpou, M., Carvalho, A., Pan, J.-S., Woźniak, M., Quintián, H. & Corchado, E., Herausgeber, *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, S. 133 – 144. Salamanca, Spanien.
- Meitinger, K.-H. (2008): *Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen*. Dissertation, Technische Universität München.
- Meitinger, K.-H., Ehmanns, D. & Heissing, B. (2004): Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen. In: *VDI-Berichte Nr. 1864 - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*, S. 145 – 158.
- Mellinghoff, U., Breitling, T., Schöneburg, R. & Metzler, H.-G. (2010): Das Experimental-Sicherheits-Fahrzeug ESF 2009. *ATZ extra - Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Bd. 15, Nr. 2: S. 80 – 87.
- Mende, O. (2011): Leichtbau für das Niedrigpreissegment. *ATZ extra - Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Bd. 16, Nr. 3: S. 26 – 31.
- Merlo, A. L. (1964): US 3152326 - Vehicle Radar System.
- Mertz, H. J. & Dalmotas, D. J. (2007): Effects of Shoulder Belt Limit Forces on Adult Thoracic Protection in Frontal Collisions. *Stapp Car Crash Journal*, Bd. 51: S. 361 – 380.
- Mesarović, M., Macko, D. & Takahara, Y. (1970): *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*. Academic Press.
- Meyer, J. P. & Seaman, M. A. (2013): A Comparison of the Exact Kruskal-Wallis Distribution to Asymptotic Approximations for All Sample Sizes up to 105. *The Journal of Experimental Education*, Bd. 81, Nr. 2: S. 139 – 156.
- Mikina, J. A. (1966): US 3253672 - Traction Control System.
- Mirwaldt, P. (2014): *Funktionsentwicklung eines Nothalteassistenzsystems bei medizinisch bedingter Fahrunfähigkeit*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Mirwaldt, P., Bartels, A., Lemmer, K., Huhle, R., Malberg, H. & Zaunseder, S. (2012): Gestaltung eines Notfallassistenzsystems bei medizinisch bedingter Fahrunfähigkeit. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*, keine Seitenangabe, auf CD. München.

- Mitschke, M. & Wiegner, P. (1970): Blockiervorgang eines gebremsten Rades. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 72: S. 359 – 363.
- Mock-Hecker, R. (1994): *Wissensbasierte Erkennung kritischer Verkehrssituationen - Erkennung von Plankonflikten*. Dissertation, Universität Ulm.
- Moen, B.-E. & Rundmo, T. (2006): Perception of Transport Risk in the Norwegian Public. *Risk Management*, Bd. 8, Nr. 1: S. 43 – 60.
- Monson, K. L. & Germane, G. J. (1999): Determination and Mechanisms of Motor Vehicle Structural Restitution from Crash Test Data. SAE Technical Paper 1999-01-0097, SAE International.
- Müller, S., Uchanski, M. & Hedrick, K. (2001): Slip-based tire-road friction estimation during braking. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, S. 213 – 220. New York, USA.
- Naab, K. & Reichart, G. (1998): *Grundlagen der Fahrerassistenz und Anforderungen aus Nutzersicht*. Seminar "Fahrerassistenzsysteme", Haus der Technik, Essen 16./17.11 1998.
- Nader, R. (1965): *Unsafe at Any Speed*. Grossman Publishers.
- Naujoks, F. & Neukum, A. (2014): Situative Faktoren in der Entstehung von Kreuzungskonflikten und Wirksamkeit einer frühzeitigen Fahrerunterstützung. In: *56. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP)*, S. ohne Seitenangabe. Gießen.
- Nehm, K. (2012): Die Strafbarkeit fahrlässiger Körperverletzung und Tötung im Straßenverkehr auf dem Prüfstand. *Zeitschrift für Rechtspolitik*, Bd. 3: S. 70 – 74.
- Newland, C., Bechler, T., Bostrum, O., Gabler, H. C., Cha, J.-G., Wong, H. L., Tylko, S. & Nevo, R. D. (2008): Occupant-to-Occupant Interaction and Impact Injury Risk in Side Impact Crashes. *Stapp Car Crash Journal*, Bd. 52: S. 327 – 347.
- Niebuhr, T., Junge, M. & Achmus, S. (2013): Pedestrian injury risk functions based on contour lines of equal injury severity using real world pedestrian/passenger-car accident data. *Annals of Advances in Automotive Medicine*, Bd. 57: S. 145 – 154.
- Niebuhr, T., Junge, M. & Achmus, S. (2015): Expanding Pedestrian Injury Risk to the Body Region Level: How to Model Passive Safety Systems in Pedestrian Injury Risk Functions. *Traffic Injury Prevention*, Bd. 16, Nr. 5: S. 519 – 531.

- Niebuhr, T., Junge, M., Heck, P., Andricevic, N. & Arregui, C. (in Bearbeitung): Using Vehicle Stiffness as a Basis for Occupant Injury Risk Functions.
- Niederer, P., Walz, F., Muser, M. & Zollinger, U. (2001): Was ist ein „schwerer“, was ein „leichter“ Verkehrsunfall? *Schweizerische Ärztezeitung*, Bd. 82, Nr. 28: S. 1535 – 1539.
- Nordmark, W. E. (1948): US 2434119 - Automatic reel.
- Nowakowski, C., Shladover, S. E., Cody, D., Bu, F., O’Connell, J., Spring, J., Dickey, S. & Nelson, D. (2011): Cooperative Adaptive Cruise Control: Testing Drivers’ Choices of Following Distances. California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2011-01, Institute Of Transportation Studies University Of California Berkeley, USA.
- O’Brien, S. (2010): *Measurement and Assessment of Passenger Vehicle Compatibility in Front and Side Collisions*. Dissertation, Royal Melbourne Institute of Technology, Australien.
- OECD (2003): Road Safety: Impact of New Technologies. Techn. Ber., Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Oppegaard, K. F. (1933): US 1909712 - Indicating Device with two Electrically Operated Signals.
- Ossiander, E. M., Koepsell, T. D. & McKnight, B. (2014): Crash fatality risk and unibody versus body-on-frame structure in SUVs. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 70: S. 267 – 272.
- Otte, D., Krettek, C. & Zwipp, H. B. H. (2003): Scientific approach and methodology of a new in-depth investigation study in germany so called GIDAS. In: *International Technical Conference on the Enhanced Safety Of Vehicles*, Paper Number 161. Nagoya, Japan.
- Otte, D., Suren, E.-G., Appel, H. & Nehmzow, J. (1984): Vehicle Parts Causing Injuries to Front-Seat Car Passengers in Lateral Impact. SAE Technical Paper 841651, SAE International.
- Page, Y., Foret-Bruno, J.-Y. & Cuny, S. (2005): Are Expected and Observed Effectiveness of Emergency Brake Assist in Preventing Road Injury Accidents Consistent? SAE Technical Paper 05-0268, SAE International.

- Page, Y., Rivière, C., Cuny, S. & Zangmeister, T. (2007): A posteriori evaluation of Safety Functions effectiveness - Methodologies. Deliverable D4.2.1., EU-Projekt: TRACE.
- Pankalla, H., Salzberger, R., Hänsel, E., Botsch, M., Breu, A. & Held, R. (2010): Der neue Audi A6 - Fahrerassistenz und integrale Sicherheit. *ATZ extra - Automobil-technische Zeitschrift extra*, Bd. 15, Nr. 11: S. 204 – 207.
- Penney, T. (1999): Intersection Collision Warning System. Techn. Ber. FHWA-RD-99-103, U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration.
- Petrucelli, E., States, J. D. & Hames, L. N. (1981): The Abbreviated Injury Scale: Evolution, Usage and Future Adaptability. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 13, Nr. 1: S. 29 – 35.
- Piccioli, G., e. De Micheli, Parodi, P. & Campani, M. (1996): Robust method for road sign detection and recognition. *Image and Vision Computing*, Bd. 14, Nr. 3: S. 209 – 223.
- Pierowicz, J., Jocoy, E., Lloyd, M., Bittner, A. & Pirson, B. (2000): Intersection Collision Avoidance Using ITS Countermeasures. NHTSA Technical Report DOT HS 809 171, U.S. Department of Transportation - National Highway Traffic Safety Administration.
- Pintar, F. A., Yoganandan, N. & Eppinger, R. H. (1998): Response and Tolerance of the Human Forearm to Impact Loading. SAE Technical Paper 983149, SAE International.
- Pipkorn, B. (1996): *Car-to-car Side Impacts: Development and Validation of Mathematical Models and their Usability for Protective System Design*. Dissertation, Chalmers University of Technology, Schweden.
- Pippert, H. (1993): *Karosserietechnik*. 2. Aufl. Vogel Fachbuch Verlag.
- Plöchl, M. & Edelmann, J. (2007): Driver models in automobile dynamics application. *Vehicle System Dynamics*, Bd. 45, Nr. 7-8: S. 699 – 741.
- Pöppel, E. (2009): Pre-semantically defined temporal windows for cognitive processing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Bd. 364, Nr. 1525: S. 1887 – 1896.

- Prasad, P., Mertz, H. J., Dalmotas, D. J., Augstein, J. S. & Digges, K. (2010): Evaluation of the Field Relevance of Several Injury Risk Functions. *Stapp Car Crash Journal*, Bd. 54: S. 49 – 72.
- PReVENT (2005): Requirements for intersection safety applications. Deliverable D40.4, EU-Projekt: PReVENT.
- Rasmussen, J. (1983): Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Bd. SMC-13, Nr. 3: S. 257 – 266.
- Reason, J. (1990): *Human Error*. Cambridge University Press.
- Reichart, G. (1999): *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München.
- Reichel, M., Bouzouraa, M. E., Siegel, A., Siedersberger, K.-H. & Maurer, M. (2010): Erweiterte Umfelderkennung und Nutzung einer Ausweichanalyse als Grundlage einer aktiven Gefahrenbremsung. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S. 149 – 169. Braunschweig.
- Reschka, A., Rieken, J. & Maurer, M. (2015): Entwicklungsprozess von Kollisionschutzsystemen für Frontalkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 3. Aufl., Kap. 48, S. 913 – 935. Vieweg+Teubner Verlag.
- Rhede, J., Wäller, C. & Oel, P. (2011): Der FAS Warnbaukasten - Strategien für die systematische Entwicklung und Ausgabe von HMI-Warnungen. In: *VDI-Berichte Nr. 2134 - Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*, S. 336 – 348.
- Richter, T. & Köhn, P. (2012): Lenkassistentenfunktionen. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 29, S. 438 – 446. Vieweg+Teubner Verlag.
- Riedel, H. (2011): *Lexikon der Kraftfahrzeugtechnik*. Motorbuch Verlag.
- Ringdal, K. G., Skaga, N. O., Hestnes, M., Steen, P. A., Røislien, J., Rehn, M., Røise, O., Krüger, A. J. & Lossius, H. M. (2013): Abbreviated Injury Scale: Not a reliable basis for summation of injury severity in trauma facilities? *Injury, International Journal of the Care of the Injured*, Bd. 44, Nr. 5: S. 691 – 699.

- Rössler, B. (2010): Status of European Project INTERSAFE-2 on Cooperative Intersection Safety. In: *International IEEE Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, S. 381 – 386. Cluj-Napoca, Rumänien.
- Rudolf, A. & Knoll, H. W. (1974): DE 2249759 A1 - Fahrzeug mit einem Haltesystem für die Insassen.
- SAE (2009): Motor Vehicle Dimensions (J 1100).
- Sahraeia, E., Digges, K., Marzouguic, D. & Roddisba, K. (2014): High strength steels, stiffness of vehicle front-end structure, and risk of injury to rear seat occupants. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 66, Nr. 5: S. 43 – 54.
- Sala, D. & Wang, J. (2003): Continuously predicting crash severity. In: *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Paper Number 314. Nagoya, Japan.
- Sandblom, F. & Brännström, M. (2011): Probabilistic Threat Assessment and Driver Modeling in Collision Avoidance Systems. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 914 – 919. Baden-Baden.
- Santamariña-Rubio, E., Pérez, K., Olabarria, M. & Novoa, A. M. (2013): Measures of exposure to road traffic injury risk. *Traffic Injury Prevention*, Bd. 19, Nr. 6: S. 436 – 439.
- Santamariña-Rubio, E., Pérez, K., Olabarria, M. & Novoa, A. M. (2014): Gender differences in road traffic injury rate using time travelled as a measure of exposure. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 65: S. 1 – 7.
- Schaper, M. (2012): *Analyse und Bewertung des Auslaufverhaltens unfallfolgenmindernder Assistenzfunktionen im Querverkehr*. Studienarbeit, Technische Universität Braunschweig, betreut durch P. Heck.
- Schilberg, F. (1973): Unfalltypen-Katalog: ein Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps entsprechend den Richtlinien zur Führung von Unfalltypen-Steckkarten. Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung des HUK-Verbandes, Verband der Schadensversicherer.
- Schmidt, G. (2009): *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.



- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (2011): *Motor Control and Learning*. 5. Aufl. Human Kinetics.
- Schmitt, J., Breu, A., Maurer, M. & Färber, B. (2007): Simulation des Bremsverhaltens in Gefahrensituationen mittels experimentell validiertem Fahrermodell. In: *VDI-Berichte Nr. 2015 - Fahrer im 21. Jahrhundert*, S. 75 – 88.
- Schockenhoff, E. (2007): *Grundlegung der Ethik. Ein theologischer Entwurf*. Herder.
- Schöneburg, R. (1988): *Zur Berechnung des Crashverhaltens von Fahrzeugen mit einfachen Strukturmodellen*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Schöneburg, R. (2010): Auf dem Weg zur virtuellen Knautschzone - Möglichkeiten des präventiven Energieabbaus und Auswirkungen auf Fahrzeug und Insassen in der Vorunfallphase. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S. 11 – 23. Braunschweig.
- Schopper, M., Henle, L. & Wohland, T. (2013): Intelligent Drive Vernetzte Intelligenz für mehr Sicherheit. *ATZ extra - Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Bd. 18, Nr. 5: S. 106 – 114.
- Schopper, M. & Missel, J. (2014): Mehr Sicherheit durch vernetzte Systeme. *ATZ extra - Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Bd. 8, Nr. 2: S. 76 – 83.
- Schorn, M. (2006): Modelle zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens. In: Isermann, R., Herausgeber, *Fahrdynamik-Regelung*, Kap. 2, S. 27 – 46. Springer Verlag.
- Schubert, R. (2010): *Fußverletzungen bei PKW-Frontinsassen: Eine Analyse des GIDAS-Datenbestandes*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- Schulze, M., Nocker, G. & Bohm, K. (2005): PReVENT: A European program to improve active safety. In: *International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications*, keine Seitenangabe, auf CD. Brest, Frankreich.
- Schuster, A., Sattler, J. & Hoffmann, S. (2011): Bestimmen der aktuellen Abmessungen differenzierter Personen-Bemessungsfahrzeuge. Elektronischer Untersuchungsbericht, Westsächsische Hochschule Zwickau in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Verkehr und Stadtbauwesen in der Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH.

- Sefati, M., Stoff, A. & Winner, H. (2013): Testing Method for Autonomous Safety Functions Based on Combined Steering/Braking Maneuvers for Collision Avoidance and Mitigation. In: 6. *FAS Tagung Fahrerassistenz*, ohne Seitenangabe. München.
- Seidenstücker, T. (2013): Die Golf-VII-Karosserie im Detail. *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Bd. 51, Nr. 1: S. 33 –36.
- Seiffert, U. (1974): *Probleme der Automobilsicherheit*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Seiffert, U., Zinke, E., Nettelau, H.-J., Fritzsche, E. & Braes, H.-H. (2011): Anforderungen, Zielkonflikte. In: Braess, H.-H. & Seiffert, U., Herausgeber, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 6. Aufl., Kap. 2, S. 7 – 32. Vieweg+Teubner Verlag.
- Seiniger, P., Westhoff, D., Fahrenkrog, F. & Zlocki, A. (2012): Legal Aspects. Deliverable D7.3, EU-Projekt: interactIVe.
- Servel, A., Knapp, A., Jung, C., Donner, E., Dilger, E., Tango, F., Mihm, J., Schwarz, J., Wood, K., Ojeda, L., Neumann, M., Brockmann, M., Meyer, M., Kiss, M., Flament, M., Kompfner, P., Walz, R., Cotter, S., Winkle, T. & Janssen, W. (2006): Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. Deliverable D11.2, EU-Projekt: RESPONSE III: a PREVENT Project.
- Severy, D. M., Brink, H. M. & Baird, J. D. (1968): Backrest and Head Restraint Design for Rear-End Collision Protection. SAE Technical Paper 680079, SAE International.
- Severy, D. M. & Mathewson, J. H. (1956): Automobile-Barrier Impacts, Series II. *Clinical Orthopaedics*, Bd. 7: S. 275 – 300.
- Singer, M. G. (1975): *Verallgemeinerung in der Ethik*. Suhrkamp.
- Sjögren, A., Bergmark, A., Bjelkeflo, L., Grubb, G., Johansson, E., Bahaghighat, M. K., Brockmann, M., Loewenau, J., Saroldi, A., Tango, F., Varalda, G., Hohm, A., Schürmann, W., Stählin, U., Strauss, M., Thur, C., Iurgel, U., Hesse, T., Benmimoun, A., Shah, J., Suermann, M., Amditis, A., Bolovinou, A., Floudas, N., Kotsiourou, C., Tsogas, M., Durekovic, S., Lang, E., Pangerl, S., Burlet, J., Vu, T.-D., Heck, P., Wohllebe, T., Wykowski, E., Andersson, D., Wahlström, L., Wyholt, A. & Mäkinen, T. (2012): interactIVe Demonstrator Vehicles. Deliverable D1.0, EU-Projekt: interactIVe.

- Slovic, P. (1987): Perception of Risk. *Science*, Bd. 236, Nr. 4799: S. 280 – 285.
- Slovic, P. (2000): *The Perception of Risk*. Earthscan Publications.
- Smith, K. M. & Cummings, P. (2004): Passenger seating position and the risk of passenger death or injury in traffic crashes. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 36, Nr. 5: S. 257 – 260.
- Smith, M. A. (1953): NON-SKID BRAKING The Maxaret Automatic Control: What It Is and What It Does. *Flight and Aircraft Engineer*, Bd. 64, Nr. 2336: S. 587 – 588.
- Stacey, S. & Kent, R. (2006): Investigation of an alleged mechanism of finger injury in an automobile crash. *International Journal of Legal Medicine*, Bd. 120, Nr. 4: S. 246 – 251.
- Staff, T., Eken, T., Wik, Røislien & Søvik, S. (2014): Physiologic, demographic and mechanistic factors predicting New Injury Severity Score (NISS) in motor vehicle accident victims. *Injury, International Journal of the Care of the Injured*, Bd. 45, Nr. 1: S. 9 – 15.
- Stählin, U. (2008): *Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Stańczyk, T. L., Lozia, Z., Pieniázek, W. & Jurecki, R. S. (2010): Untersuchung der Fahrerreaktionen auf von Rechts Anfahende Fahrzeuge. In: *19. EVU Jahrestagung*, S. 43 – 57. Prag, Tschechien.
- Stanton, N. & Young, M. S. (1998): Vehicle Automation and driving performance. *Ergonomics*, Bd. 41, Nr. 7: S. 1014 – 1028.
- States, J. D. (1969): The Abbreviated and Comprehensive Research Injury Scales. SAE Technical Paper 690810, SAE International.
- Staubach, M. (2009a): Factors correlated with traffic accidents as a basis for evaluating Advanced Driver Assistance Systems. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 41, Nr. 5: S. 1025 – 1033.
- Staubach, M. (2009b): *Identifikation menschlicher Einflussfaktoren auf Verkehrsunfälle als Grundlage zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystem-Potentialen*. Dissertation, Technische Universität Dresden.

- Steffan, H. & Moser, A. (1996): The Collision and Trajectory Models of PC-CRASH. SAE Technical Paper 960886, SAE International.
- Stemper, B. D. & Pintar, F. A. (2014): Biomechanics of Concussion. *Progress in Neurological Surgery*, Bd. 28: S. 14 – 27.
- Stiller, C. (2005): Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: Maurer, M. & Stiller, C., Herausgeber, *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, 1. Aufl., Kap. 1, S. 1 – 20. Springer Verlag.
- Stoff, A. & Liers, H. (2013): Ausweichfunktionalität für Kreuzungsszenarien zur Unfallfolgen-linderung durch Optimierung der Crash-Kompatibilität. In: *VDI-Berichte Nr. 2204 - Fahrzeugsicherheit – Sicherheit 2.0*, S. 177 – 192.
- Stolinski, R., Grzebieta, R. & Fildes, B. (1998): Vehicle Far-Side Impact Crashes. In: *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Paper Number 98-S8-W-23. Windsor, Canada.
- Strigel, E., Meissner, D. & Dietmayer, K. (2013): Vehicle Detection and Tracking at Intersections by Fusing Multiple Camera Views. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 882 – 887. Gold Coast, Australien.
- Sundararajan, S., Rouhana, S. W., Board, D., DeSmet, E., Prasad, P., Rupp, J. D., Miller, C. S. & Schneider, L. W. (2011): Biomechanical Assessment of a Rear-Seat Inflatable Seatbelt in Frontal Impacts. *Stapp Car Crash Journal*, Bd. 55: S. 161 – 197.
- Sychrovský, O., Matoušek, M. & Šára, R. (2013a): FPGA-Accelerated Sliding Window Classifier with Structured Features. In: *International IEEE Conference on Field Programmable Logic and Applications*, S. 1 – 4. Porto, Portugal.
- Sychrovský, O., Matoušek, M. & Šára, R. (2013b): FPGA-accelerated sliding window classifier with structured features. Research Report of CMP No. 16, Center for Machine Perception - Czech Technical University in Prague.
- Tingvall, C., Krafft, M., Lie, A. & Kullgren, A. (2003): The Role of Impact Velocity and Change of Velocity in Side Impacts. In: *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Paper Number 219. Nagoya, Japan.

- Toloueia, R., Maherb, M. & Titheridgea, H. (2013): Vehicle mass and injury risk in two-car crashes: A novel methodology. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 50: S. 155 – 166.
- Ulfarsson, G. F. & Mannering, F. L. (2004): Differences in male and female injury severities in sport-utility vehicle, minivan, pickup and passenger car accidents. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 36, Nr. 2: S. 135 – 147.
- UN (1968): (Wiener) Übereinkommen über den Strassenverkehr.
- UNECE (1995): Übereinkommen über die Annahme einheitlicher technischer Vorschriften für Radfahrzeuge, Ausrüstungsgegenstände und Teile, die in Radfahrzeuge(n) eingebaut und/oder verwendet werden können, und die Bedingungen für die gegenseitige Anerkennung der Genehmigungen, die nach diesen Vorschriften erteilt wurden (E/ECE/324, Revision 2).
- UNECE (2006): Regelung Nr. 79, Revision 2 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage (E/ECE/324/Add.79).
- UNECE (2010): Regelung Nr. 13-H der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen (E/ECE/324/Add.13H).
- UNECE (2013): Addendum: 130: Regulation: 131 - Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Advanced Emergency Braking Systems (AEBS) (E/ECE/324/Rev.2/Add.130).
- UNECE (2014): Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety (ECE/TRANS/WP.1/145).
- Unsel, T. & Eckstein, J. B. L. (2004): Fußgängerschutz durch Bremsassistentz. In: *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistentz*, Vortrag Nummer 14. München.
- URBAN (2012): Projektbeschreibung UR:BAN. Stand Oktober 2013.  
Veröffentlicht im Internet: [http://www.urban-online.org/cms/upload/download/de/Broschueren/projektbeschreibung\\_urban.pdf](http://www.urban-online.org/cms/upload/download/de/Broschueren/projektbeschreibung_urban.pdf)
- Urry, J. (2005): The Complexity Turn. *Theory Culture Society*, Bd. 22, Nr. 5: S. 1 – 14.

- van Zanten, A. & Kost, F. (2012): Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 25, S. 356 – 394. Vieweg+Teubner Verlag.
- Veruggio, G. (2006): EURON - Roboethics Roadmap. Techn. Ber., EURON Roboethics Atelier.
- Viano, D. C. & Lau, I. V. (1985): Thoracic Impact: A Viscous Tolerance Criterion. In: *International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, S. 104 – 114. Oxford, Vereinigtes Königreich.
- Viano, D. C., Lau, I. V., Andrzejak, D. V. & Asbury, C. (1989a): Biomechanics of Injury in Lateral Impacts. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 21, Nr. 6: S. 535 – 551.
- Viano, D. C., Lau, I. V., Asbury, C., King, A. I. & Begeman, P. (1989b): Biomechanics of the Human Chest, Abdomen, and Pelvis in lateral Impact. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 21, Nr. 6: S. 553 – 574.
- Viano, D. C., Parenteau, C. S. & Burnett, R. (2012): Influence of Belt Pretensioning on Dummy Responses in 40 km/h Rear-Impact Sled Tests. *Traffic Injury Prevention*, Bd. 13, Nr. 1: S. 65 – 71.
- Vlassenroot, S., Broekx, S., Mol, J. D., Panis, L. I., Brijs, T. & Wets, G. (2007): Driving with Intelligent Speed Adaptation: Final Results of the Belgian ISA-trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 41, Nr. 3: S. 267 – 279.
- Volvo Cars (2012): The all-new Volvo V40 - Safety & Support. Stand Oktober 2014. Veröffentlicht im Internet: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/45562/the-all-new-volvo-v40-safety-and-support-the-most-intellisafe-car-in-the-segment>
- Volvo Cars (2014): All-new Volvo XC90: two world-firsts, one of the safest cars in the world. Stand September 2014. Veröffentlicht im Internet: <http://www.volvocars.com/uk/top/about/news-events/pages/default.aspx?itemid=240>
- Vorndran, I. (2010): Unfallstatistik-Verkehrsmittel im Risikovergleich. *Wirtschaft und Statistik*, Bd. 61, Nr. 12: S. 1083 – 1089.

- Wallach, W. (2010): Robot minds and human ethics: the need for a comprehensive model of moral decision making. *Ethics and Information Technology*, Bd. 12, Nr. 3: S. 243 – 250.
- Wallach, W., Allen, C. & Smit, I. (2008): Machine morality: Bottom-up and top-down approaches for modelling human moral faculties. *AI & Society*, Bd. 22, Nr. 4: S. 565 – 582.
- Wallner, D., Eichberger, A. & Hirschberg, W. (2010): A Novel Control Algorithm for Integration of Active and Passive Vehicle Safety Systems in Frontal Collisions. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, Bd. 8, Nr. 5: S. 6 – 11.
- Walz, M. C. (2003): NCAP Test improvements with pretensioners and load limiters. NHTSA Technical Report DOT HS 809 562, U.S. Department of Transportation - National Highway Traffic Safety Administration.
- Weber, S. (in Bearbeitung): *Standardreaktionen – Wie reagieren Fahrer in kritischen Situationen?* Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Wertheimer, R., Brunsmann, U., Breuel, G., Dietmayer, K., Doll, K., Fritzsche, M., Fuchs, E., Goldhammer, M., Haselhoff, A., Janda, F., Kasper, D., Klanner, F., Kloeden, H., Kopetzki, S., Krug, S., Krzikalla, R., Liebner, M., Meißner, D., Naujoks, F., Neukum, A., Papierok, S., Petrich, D., Quittenbaum, P., Rauch, A., Seeliger, F., Striegel, E., Vetter, J., Wankerl, M., Wedel, A. & Weidl, G. (2014): Ko-PER – Fahrerassistenz und präventive Sicherheit mittels kooperativer Perzeption: Partnerübergreifender Schlussbericht. Schlussbericht, Forschungsinitiative Ko-FAS.
- WHO (2009): Global Status Report on Road Safety - Time for Action. Techn. Ber., World Health Organization.
- Williams, B. (1981): *Moral Luck*. Cambridge University Press.
- Winner, H. (2012): Frontalkollisionsschutzsysteme. In: Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Aufl., Kap. 33, S. 522 – 542. Vieweg+Teubner Verlag.
- Winner, S., Hakuli, S. & Wolf, G., Herausgeber (2012): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag.

- Winnicki, J. & Eppinger, R. (1998): A Method for Estimating the Effect of Vehicle Crashworthiness Design Changes on Injuries and Fatalities. NHTSA Technical Report DOT HS 808 680, U.S. Department of Transportation - National Highway Traffic Safety Administration.
- Wood, D. P. (1997): Safety and the Car Size Effect: A Fundamental Explanation. *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 29, Nr. 2: S. 139 – 151.
- Woolley, R. & Asay, A. (2008): Crash Pulse and DeltaV Comparisons in a Series of Crash Tests with Similar Damage (BEV, EES). SAE Technical Paper 2008-01-0168, SAE International.
- Wykowski, E. (2011): Biomechanik der oberen Extremitäten des Menschen mit dem Schwerpunkt möglicher Verletzungen durch das Lenkrad. Forschungsbericht, Volkswagen Konzernforschung.
- Yamada, H. (1970): *Strength of Biological Materials*. Williams & Wilkins.
- Yang, D., Jacobson, B. & Lidberg, M. (2009): Benefit Prediction of Passenger Car Post Impact Stability Control Based on Accident Statistics and Vehicle Dynamics Simulations. In: *IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, S. 1 – 12. Stockholm, Schweden.
- Yang, Z., Kobayashi, T. & Katayama, T. (2000): Development of an Intersection Collision Warning System Using DGPS. SAE Technical Paper 2000-01-1301, SAE International.
- Young, R.-D. (1977): US 5689496 - Passing Vehicle Signalling Apparatus.
- Zeidler, F. (1982): *Die Analyse von Straßenverkehrsunfällen mit verletzten Pkw-Insassen unter besonderer Berücksichtigung von versetzten Frontalkollisionen mit Abgleiten der Fahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Zimmer, A. (2001): Wie intelligent darf/muss ein Auto sein? Anmerkungen aus ingenieurspsychologischer Sicht. In: Jürgensohn, T. & Timpe, K.-P., Herausgeber, *Kraftfahrzeugführung*, 1. Aufl., Kap. 3, S. 9 – 27. Springer Verlag.



# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

$\mu$	Reibkoeffizient zwischen Straße und Reifen
ABS	Anti-Blockiersystem
ACC	Adaptive cruise control
AIS	Abbreviated Injury Scale
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
C2C	Kommunikation zwischen Fahrzeugen
C2X	Kommunikation zwischen Fahrzeugen bzw. zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur
CHMSL	Center high mounted stop lamp; dt. 3. Bremsleuchte
EES	Energy-Equivalent Speed
ESC	Electronic Stability Control
FVC	Forward vehicle collision
FVCA	Forward vehicle collision avoidance
FVCC	Forward vehicle collision conditioning
FVCM	Forward vehicle collision mitigation
FVCP	Forward vehicle collision post-crash safety
FVCW	Forward vehicle collision warning
FVCX	Obermenge der Frontalkollisionsassistentensysteme

GIDAS	German In-Depth Accident Study
Handlung	Brems- oder Lenkeingriff bzw. die Kombination daraus
HMI	Human Machine Interface (vergleiche MMI)
ISS	Injury Severity Score
ISSx	umskalierter Injury Severity Score
MAIS	Maximale AIS Verletzung; entweder pro Person, Fahrzeug oder Unfall
MMI	Mensch-Maschine-Interface (engl. HMI)
Mpv	Multi Person Vehicles – z.B. Vans
NASS-CDS	National Automotive Sampling System-Crashworthiness Data System
Pkw	Personenkraftwagen
TL	Trefferlage
TLÄ	Trefferlageänderung
TTC	Time to Collision

### Symbolverzeichnis

$\vec{F}_x$	Vektor der übertragenden Kraft in X-Richtung	
$\vec{F}_y$	Vektor der übertragenden Kraft in Y-Richtung	
$\vec{F}_{Gesamt}$	Beschleunigungsvektor einer Handlung	
$\Delta v$	Geschwindigkeitsänderung des stoßenden Fahrzeugs in der Kollision; eigentlich die vektorielle Geschwindigkeitsänderung $ \Delta \vec{v} $	m/s <sup>2</sup>
$\dot{\phi}$	zeitabhängige Rotationsgeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs	m/s
$\omega_S$	Winkelgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs	Bog/s
$\omega'_S$	Winkelgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs nach dem Stoß	Bog/s
$\phi \cdot 2$	Gesamtöffnungswinkel eines Sensors	°

$\phi$	Öffnungswinkel	°
$\phi_{hinten}$	Öffnungswinkel eines Sensors zur Erfassung der Hinterkante eines querenden Fahrzeugs	°
$\phi_{vorne}$	Öffnungswinkel eines Sensors zur Erfassung der Vorderkante eines querenden Fahrzeugs	°
$\Theta_S$	Massenträgheitsmoment des jeweiligen Fahrzeugs	kg m <sup>2</sup>
$s_1$	Index des gestoßenen Fahrzeugs	
$s_2$	Index des stoßenden Fahrzeugs	
$A$	Abstand Vorderkante $S_1$ zum Kollisionspunkt, zur Öffnungswinkelberechnung	m
$a$	Fahrzeugbreite des jeweiligen Fahrzeugs	m
$B$	Fahrzeuglänge, zur Öffnungswinkelberechnung	m
$b$	Fahrzeuglänge des jeweiligen Fahrzeugs	m
$C$	Abstand Vorderkante $S_2$ zum Kollisionspunkt, zur Öffnungswinkelberechnung	m
$D$	Sensorversatz, Abstand des Sensors von der Vorderkante $S_2$ , zur Öffnungswinkelberechnung	m
$E_{D_S}$	In plastische Deformation umgesetzter Anteil der kinetischen Energie am jeweiligen Fahrzeug	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
$E_{Gesamt}$	Im Stoß umgesetzte Energie	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
$E_{max}$	Maximal umsetzbare Energie im Stoß	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
$E_{R_S}$	Rotatorischer Anteil der kinetischen Energie des jeweiligen Fahrzeugs	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
$E_{Rest}$	In restliche Formen umgesetzter Anteil der kinetischen Energie; beispielsweise Scherung, Reibung, Hubarbeit	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
$E_{T_S}$	Translatorischer Anteil der kinetischen Energie des jeweiligen Fahrzeugs	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$

$k$	Stoßzahlhypothese, Stoßziffer, Restitutionskoeffizient	
$l_{yKol}$	Abstand der Mitte des stoßenden Fahrzeugs zum Schwerpunkt des gestoßenen Fahrzeugs	m
$m$	Masse des jeweiligen Fahrzeugs	kg
$P$	Stoßantrieb	$\frac{\text{kg m}}{\text{s}}$
$r_m$	Abstand des Momentanpols zum Schwerpunkt des gestoßenen Fahrzeugs	m
$s_{1x}$	translatorischer Versatz des gestoßenen Fahrzeugs	m
$v_S$	Geschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs	m/s
$v'_S$	Geschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs nach dem Stoß	m/s
Rz	Randziffer	
$v_{0S}$	Ausgangsgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs in der Gefahrensituation	

# **Anhang A**


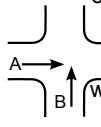
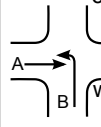
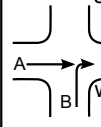
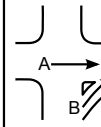
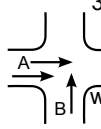
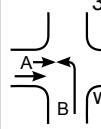
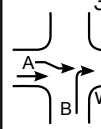
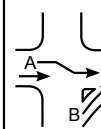

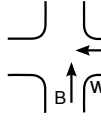
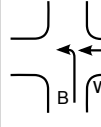
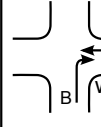
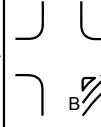
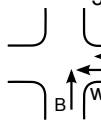
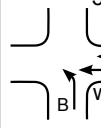
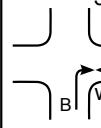
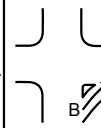
## **Anhang**

### **A.1 Historie der Sicherheitssysteme**

**Tabelle A.1:** Übersicht zu Systemen der aktiven und passiven Sicherheit. Eine Auflistung der gesetzlichen Anforderungen in Deutschland (inkl. der UN/ECE Verordnungen) findet sich in Seiffert et al. (2011, Abschnitt 2.2.2).

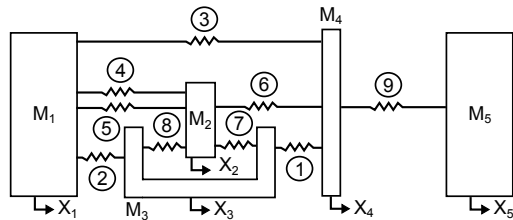
Systemname	I. Veröffentlichung (Patent/Paper, Jahr)	I. Markteinführung (Hersteller Modell, Jahr)	Serieneinführung in Deutschland (Modell Hersteller, Jahr)
Sicherheitsgurt	Claghorn (1985)	Tucker Torpedo, 1948	Saab GT 750, 1958
3 Punkt Gurt	Grissold & DeHaven (1955)	Volvo 544, 1959	Volvo 544, 1959
Gurtkraftbegrenzer	Bayer (1965)	Mercedes Benz W 126, 1981	Mercedes Benz W 126, 1981
Gurtsraffer	Nordmark (1948)	Mercedes Benz W 126, 1981	Mercedes Benz W 126, 1981
Elektrische (reversible) Gurtsraffer	Rudolf & Knoll (1974)	Mercedes W 220, 2002	Mercedes W 220, 2002
Motorisierte (aktive) Gurtschlösser	Haag & Roth (2003)	Mercedes W 220, 2013	–
Aufblasbare Gurte	Lewis (1974)	Ford Explorer, 2010	–
Kopfstütze	Katz (1923)	div. Nachrüstlösungen	–
Fahnenairbag	Linderer (1951)	Buick Riviera, 1974	Mercedes Benz W 126, 1989
Beifahrerairbag	s.o.	Buick Riviera, 1974	Volvo S80, 1998
Kopfairbag (Curtain)	s.o.	BMW 7er, 1997	Toyota Avensis, 2003
Kneairbag	s.o.	Kia Sportage 1998	Volvo 850, 1995
Seitenairbag	s.o.	Volvo 850, 1994	Volvo 850, 1995
Außenairbag	s.o.	Volvo V40, 2012	Volvo V40, 2012
Fahrgastzelle	Barényi (1952)	Mercedes Benz W 120, 1953	Mercedes Benz W 120, 1953
Knautschzone	Barényi (1969)	Mercedes Benz W 111, 1959	Mercedes Benz W 111, 1959
Seitenaufprallschutz nachgebender Lenkstock	Forsting et al. (1971)	Plymouth Barracuda, 1970	Volvo 850, 1991
	Barényi (1971)	Mercedes Benz W 111, 1967	Mercedes Benz W 111, 1967
Brennstoffverkleinerer	Dewandre (1927)	Pierce-Arrow, 1928	Mercedes Benz W 121, 1956
3. Bremsleuchte	Oppegaard (1933)	For Thunderbird, 1968	Mercedes Benz W 210, 1995
BAS	Heibel (1994)	Mercedes Benz W 140, 1996	Mercedes Benz W 140, 1996
mechanisches ABS	Hallot (1927)	Jensen FF, 1966	–
Traiktionskontrollsysteme	Carp & Slavin (1970)	Chrysler Imperial, 1971	Mercedes Benz W 126, 1984
ESC	Mikina (1966)	Buick Riviera, 1971	Mercedes Benz W 126, 1989
Post Impact Control	Becker et al. (1992)	Mercedes Benz W 140, 1995	Mercedes Benz W 140, 1995
eCall	Yang et al. (2009)	Volkswagen Golf VII, 2012	Volkswagen Golf VII, 2012
Spurverlassenwarnung	Kavalir & Studnicka (1975)	Mercedes Benz W 220, 1997	EU-Vorschrift ab 2015
Spurhalteassistent	Grünecker et al. (1975)	Nissan Cima, 2001	–
Spurwechselassistent	s.o.	Honda Inspire, 2003	–
Verkehrszeichenerkennung	Young (1977)	Volvo S80, 2006	Volvo XC60, 2008
ACC	Piccoli et al. (1996)	BMW 7er, 2007	–
Collision Avoidance/Mitigation (by braking)	Merlo (1964)	Mitsubishi Diamante 1995, 1997	–
	Fujiki (1975)	Honda Inspire, 2003	Volvo XC60, 2008

## A.2 Betrachtete Unfalltypen

Typ 3: Einbiegen / Kreuzen - Unfall					
 Bevorrechtigter von links	30	301	302	303	304
					
	31	311	312	313	314
					
 Bevorrechtigter von rechts	32	321	322	323	324
					
	33	331	332	333	334
					

**Abbildung A.1:** Für diese Arbeit prinzipiell berücksichtigte Unfalltypen 30X bis 33X nach Schilberg (1973). B bezeichnet das stoßende Fahrzeug, A das gestoßene Fahrzeug, W gibt den wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer an.

A.3 Mehrkörperstrukturmodelle



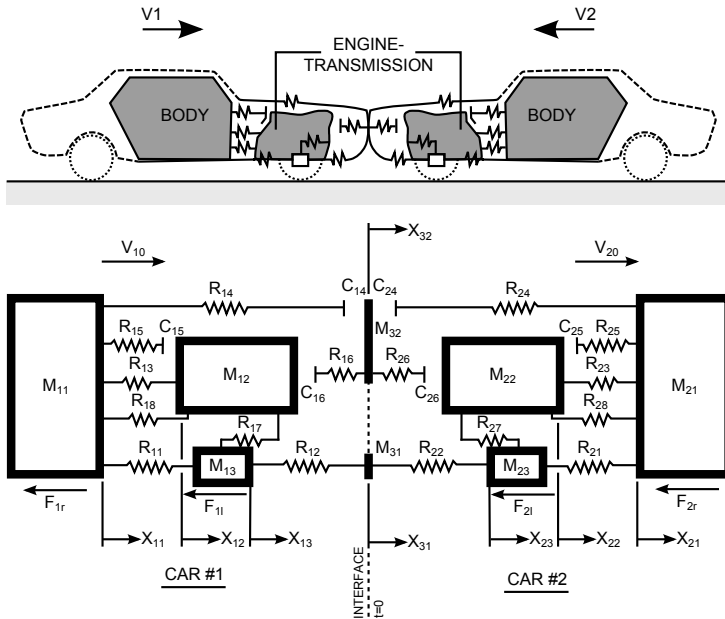
Masse	Erklärung
M1	TOTAL CAR LESS M2 AND M3
M2	ENGINE AND TRANSMISSION
M3	FRONT CROSSMEMBER, TIRES, SUSPENSION AND WHEELS
M4	STRIKING VEHICLE BUMPER AND STRUCK VEHICLE SIDE STRUCTURE
M5	REMAINDER OF STRUCK VEHICLE MASS

Elemente	Erklärung
1	FRONT OF RAILS
2	REAR OF RAILS
3	FRONT SHEETMETAL
4	DRIVELINE
5	DASH
6	RADIATOR
7	ENGINE MOUNTS FWD
8	ENGINE MOUNTS RWD
9	STRUCK VEHICLE ELEMENTS

Abbildung A.2: Mehrkörperstrukturmodell zur Beschreibung von Fahrzeugseitenkollisionen (Front-Seite) nach Greene (1977).





For  $i = 1$  and  $i = 2$ ,

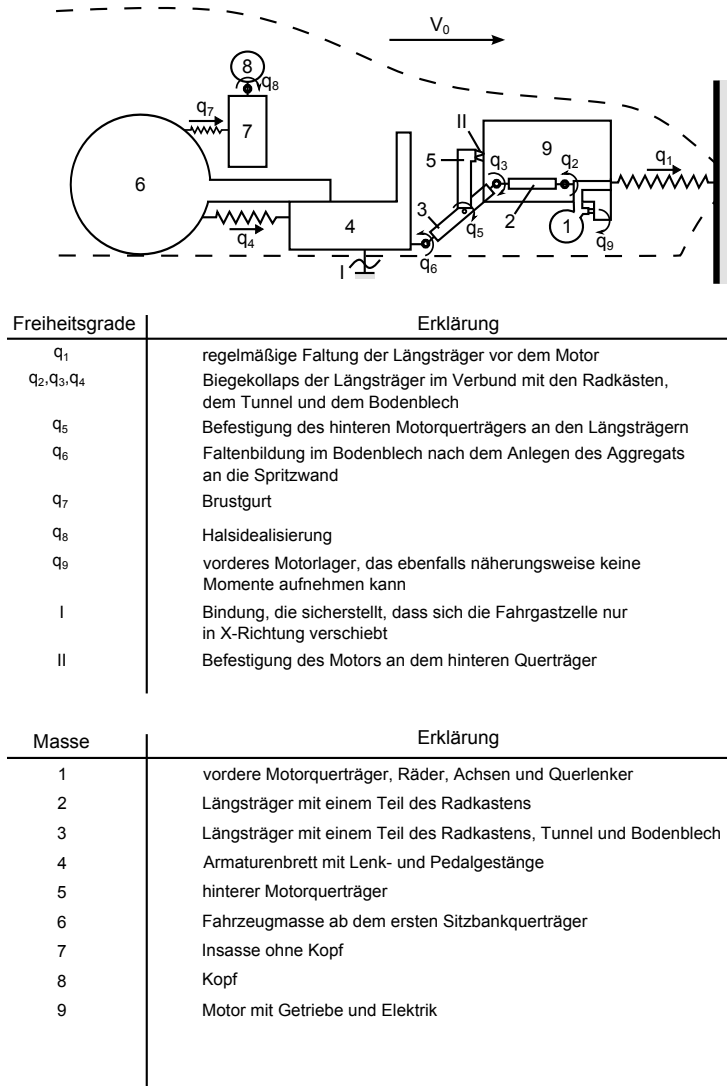
$M_{11}$  = body mass  
 $M_{12}$  = engine plus transmission mass  
 $M_{13}$  = engine crossmember plus suspension mass,

$M_{31}$  = fictitious mass at lower interface  
 $M_{32}$  = fictitious mass at upper interface

$C_{14}$  = sheet metal clearance  
 $C_{15}$  = firewall clearance  
 $C_{16}$  = radiator clearance

$R_{11}$  = torque box  
 $R_{12}$  = front frame (including bumper and bumper brackets)  
 $R_{13}$  = driveline  
 $R_{14}$  = sheet metal  
 $R_{15}$  = firewall  
 $R_{16}$  = radiator, fan and grille  
 $R_{17}$  = engine mounts  
 $R_{18}$  = transmission mount

**Abbildung A.3:** Mehrkörperstrukturmodell zur Beschreibung von Fahrzeugkollisionen (Front-Front) nach Lin et al. (1975).



**Abbildung A.4:** Mehrkörperstrukturmodell zur Beschreibung von Fahrzeugkollisionen nach (Frontaufprall) nach Schöneburg (1988, Abschnitt 4.8.3.1).

## **A.4 Wirkfeldanalyse der Geschwindigkeiten**

**Tabelle A.2:** Geschwindigkeit der Fahrzeuge vor Kollision aus Abschnitt 3.2.1. Angaben aus GIDAS (n = 258)

[km/h]	Fahrzeug mit Seitenkollision													Anzahl
	0-2	3-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	>111	
Fahrzeug mit Frontkollision	0-2	0,78%	0,00%	0,39%	0,00%	0,39%	1,16%	0,39%	0,39%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10
	3-10	0,00%	0,00%	0,00%	0,78%	0,78%	3,10%	1,16%	2,33%	1,94%	0,00%	0,00%	0,00%	31
	11-20	0,00%	0,00%	0,39%	0,39%	0,78%	3,10%	4,26%	1,94%	3,10%	1,16%	0,39%	0,00%	46
	21-30	0,00%	0,00%	0,78%	2,33%	2,71%	3,49%	5,04%	2,71%	1,94%	1,94%	0,39%	0,39%	58
	31-40	0,00%	0,78%	0,00%	0,78%	1,55%	3,10%	2,71%	1,55%	0,78%	0,39%	0,00%	0,00%	31
	41-50	0,00%	1,16%	1,55%	1,55%	2,71%	5,04%	1,55%	1,55%	0,00%	0,39%	0,00%	0,00%	44
	51-60	0,00%	0,39%	0,39%	0,78%	1,16%	0,78%	1,16%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	14
	61-70	0,39%	0,00%	0,39%	0,00%	0,39%	0,78%	0,00%	0,78%	0,78%	0,00%	0,00%	0,00%	11
	71-80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39%	0,39%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2
	81-90	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39%	0,78%	0,39%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39%	6
	91-100	0,00%	0,39%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39%	0,00%	0,78%	4
	101-110	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1
	>111	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0
Anzahl	3	7	10	18	30	55	47	31	18	22	11	2	4	Σ 258

Summe	15,21%	=	15,21%	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h
41,15%	=	15,21%	25,94%				
60,53%	=	15,21%	25,94%	19,38%			
74,87%	=	15,21%	25,94%	19,38%	14,34%		

## **A.5 Verletzung der Finger und Hände**

**Tabelle A.3:** Übersicht der Kräfte, bei denen es zu Verletzungen kommt

Körperregion	Kriterium	Größe	Art der Kräfteinwirkung	Quelle
Arm	Kraft	150 ... 6.400 N	Abstützkraft	Kramer (2009, Abschnitt 3.3.4)
Unterarm	Biegemoment	99 Nm	Biegung ( $v = 7,6 \text{ m/s}$ )	Pintar et al. (1998)
Ellenbogen	Scherkraft	180 ... 220 N	Scherbelastung	Kramer (2009, Abschnitt 3.3.4)
Handgelenk	Scherkraft	100 ... 180 N	Scherbelastung	Kramer (2009, Abschnitt 3.3.4)
Hand	Kraft	3.800 N	Stat. Hand-Kontaktkraft	Kramer (2009, Abschnitt 3.3.4)
Finger (Phalangen V-II)	Druckkraft	245 ... 1.155 N	Stat. Druckversuch	Kent et al. (2008)
Zeige-, Ringfinger	Scherkraft	1.400 N	90° Lenkraddrehung in 100 ms	Stacey & Kent (2006)
Oberarmknochen	max. Biegekraft	1.150 ... 1.510 N	stat. Biegung	Yamada (1970, Abschnitt 3.1.2.2.1)
Speiche	max. Biegekraft	440 ... 600 N	stat. Biegung	Yamada (1970, Abschnitt 3.1.2.2.1)
Elle	max. Biegekraft	560 ... 720 N	stat. Biegung	Yamada (1970, Abschnitt 3.1.2.2.1)
Mittelhandknochen	Biegekraft	700 ... 1.300 N	stat. Biegung	Faerber et al. (1976, Seite 48 - 49)
Fingergrundglied	Biegekraft	700 ... 1.200 N	stat. Biegung	Faerber et al. (1976, Seite 48 - 49)

## **A.6 ISO 26262 Bewertung**

Im Folgenden sind die zur Bewertung genutzten Definitionen sowie die Tabellen der Gefahren- und Risikoanalyse aus Abschnitt 3.4.3 abgedruckt.

**Tabelle A.4:** Verwendete Definitionen der Parameter für die G&R. Abweichungen zu ISO 26262 sind fett dargestellt.

Class	E1	E2	E3	E4
Description	Very low probability	Low probability	Medium probability	High probability
Frequency of situation	Occurs less often than once a year for the great majority of drivers	Occurs a few times a year for the great majority of drivers	Occurs once a month or more often for an average driver	Occurs during almost every drive on average
Class	C1	C2	C3	C4
Description	Controllable in general	Simply controllable	Normally controllable	Difficult to control or uncontrollable
Frequency of situation	Controllable in general	<b>85 %</b> or more of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid harm <b>easily</b>	<b>85 %</b> or more of all drivers or other traffic participants are usually able to avoid harm	<b>Controllable by only the most experienced drivers</b>
Class	S0	S1	S2	S3
Description	No injuries	Light and moderate injuries	Severe and life-threatening injuries (survival probability)	Life-threatening injuries (survival uncertain), fatal injuries
Frequency of situation	<b>MAIS 0-1</b> , Damage that cannot be classified safety-related	More than 10 % probability of <b>MAIS 2+</b> (and not S2 or S3)	More than 10 % probability of <b>MAIS 3+</b> (and not S3)	More than 10 % probability of <b>MAIS 4+</b>



**Tabelle A.5:** ASIL Bewertung der Trefferlagenänderung. Abkürzungen: stoßendes Fahrzeug (SF), gestoßenes Fahrzeug (GF), ursprüngliches GF stößt SF in Front (Front(SF)), Fahrgastzelle (FGZ)

Systemverhalten	Beschreibung	Trefferlagen- änderung auf:	Systemstatus	Verkehrsdomäne	resultierende Trefferlage	E-Wert	C-Wert	S-Wert			ASIL	
								Stoßendes Fahrzeug	Alt	Neu+	Gestoßenes Fahrzeug	Neu+
Normal	Das System deaktiviert den Querverkehr und führt ein Brems-/Lenkmanöver durch.	---	Aus	Fahren im Wohngebiet	FGZ	4	3	1	2	1	C	B
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	1	1	B	B
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	1	1	B	B
		---	Aus		FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	2	1	C	B
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	1	1	B	B
	Fahren in der Stadt	---	Aus	Ausfallstraßen	FGZ	4	3	1	3	3	D	D
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	1	1	B	B
		---	Aus		Landstraßen	FGZ	4	3	1	3	D	D
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	2	3	3	D	D
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	2	2	C	C
zu früh	Brems-/Lenkmanöver startet zu früh	---	Aus	Landstraßen (Kreuzungen) (SF+GF 80km/h)	FGZ	3	3	3	3	3	C	C
		Vorderachse	Ein		Front	3	3	3	3	3	C	C
		Hinterachse	Ein		Heck	3	3	3	3	2	C	C
		---	Aus		Landstraßen (Auffahrten) (SF 100km/h, GF 30km/h)	FGZ	4	3	1	3	D	C
		Vorderachse	Ein		Front (SF)	4	3	1	2	1	C	B
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	2	2	C	C
zu spät	Brems-/Lenkmanöver startet zu spät	---	Aus	Fahren in der Stadt	FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
		---	Aus		FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
zu gering	Brems-/Lenkmanöver ist vom Umfang her nicht ausreichend.	---	Aus	Fahren in der Stadt	FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
		---	Aus		FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
zu groß	Brems-/Lenkmanöver ist vom Umfang her zu weit.	---	Aus	Fahren in der Stadt	FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
		---	Aus		FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
Nicht-auslösung (false-negative)	Das System initiiert kein Brems-/Lenkmanöver obwohl die Voraussetzungen für die Antriebskonfiguration erfüllt sind.	---	Aus	Fahren in der Stadt	FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
		---	Aus		FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
	Entspricht Fahrzeug ohne System	---	Aus	Fahren in der Stadt	FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C
		---	Aus		FGZ	4	3	1	3	2	D	C
		Vorderachse	Ein		Front	4	3	1	3	2	D	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	3	2	D	C

**Tabelle A.6:** ASIL Bewertung des Systemeingriffs im Falle einer Fehlauflösung (false-positive).

Systemverhalten	Beschreibung	Fehlauflösung mit	Systemstatus	Verkehrsdomäne	resultierende Treffertage	E-Wert	C-Wert	S-Wert		ASIL			
								Stoßendes Fahrzeug	Auffahrendes Fahrzeug	Gestoßenes Fahrzeug	Alt	Neu+	
unerwartete Fehl- auflösung (false- positive)	Ein Brems- /Lenkmanöver startet, ohne dass es sich um eine zu adressier- ende Gefahren- situation handelt	reiner Bremsung	Ein	Ausfallstraße	-	4	3	1	2	1	C	B	
			Ein	Landstraße	-	4	3	3	3	3	D	D	
			Ein	Autobahn	-	3	2	3	3	3	B	B	
	reinem Lenken		Ein	Ausfallstraße	-	4	2	1	2	1	B	A	
			Ein	Landstraße	-	4	2	3	3	3	C	C	
			Ein	Autobahn	-	3	2	3	3	3	B	B	
	Bremsen und Lenken		Ein	Ausfallstraße	-	4	2	1	2	1	B	A	
			Ein	Landstraße	-	4	2	3	3	3	C	C	
			Ein	Autobahn	-	3	2	3	3	3	B	B	

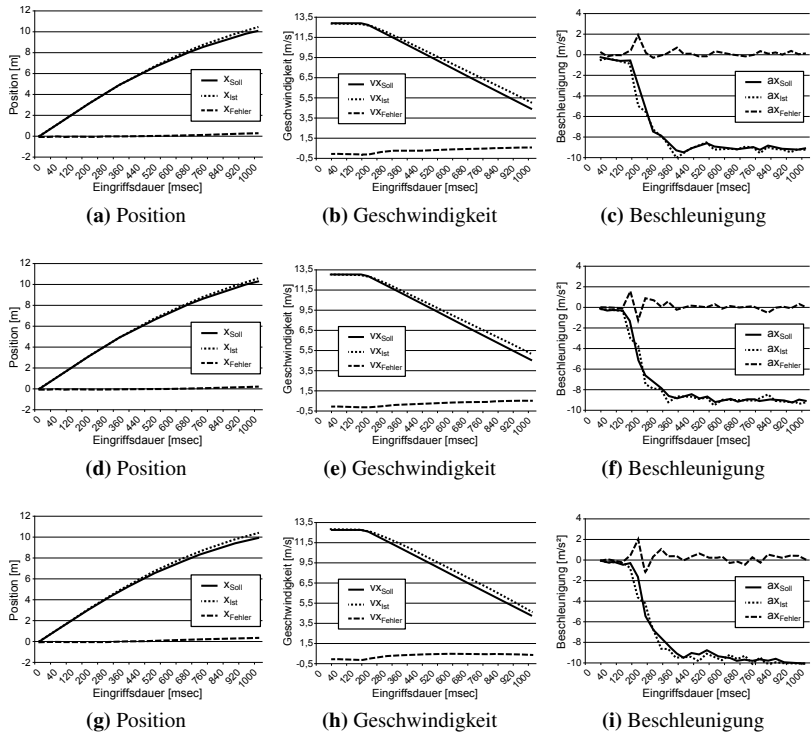
**Tabelle A.7:** ASIL Bewertung des Systemeingriffs für zwei Fahrzeuge, die beide mit einem (nicht kooperativen) System zur Trefferlagenänderung ausgerüstet sind und gleichzeitig auslösen. Abkürzungen: stoßendes Fahrzeug (SF), gestoßenes Fahrzeug (GF), ursprüngliches GF stößt SF in Front (Front(SF)), Fahrgastzelle (FGZ)

Systemverhalten	Beschreibung	Trefferlagen- änderung auf:	Systemstatus	Verkehrsdomäne	resultierende Trefferlage	E-Wert	C-Wert	S-Wert			ASIL	
								Stoßendes Fahrzeug	Gestoßenes Fahrzeug	Neu++	Gestoßenes Fahrzeug	Alt
Normal	Das System detektiert den Querverkehr und löst ein Brems- /Lenkmanöver durch:	---	Aus		Front	4	3	1	-	1	-	B
		Vorderachse	Ein	Fahren im Wohngebiet	Front	4	3	1	-	1	-	B
			Ein		Front(SF)	4	3	1	-	1	-	B
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	-	0	-	B
			Ein		FGZ	4	3	1	-	1	-	B
		---	Aus		Front	4	3	1	-	2	-	C
		Vorderachse	Ein	Fahren in der Stadt	Front	4	3	1	-	1	-	B
			Ein		Front(SF)	4	3	1	-	1	-	B
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	-	1	-	B
			Ein		FGZ	4	3	1	-	2	-	C
		---	Aus		Front	4	3	1	-	3	-	D
		Vorderachse	Ein	Ausfallstraßen	Front	4	3	1	-	2	-	C
			Ein		Front(SF)	4	3	2	-	1	-	C
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	1	-	1	-	B
			Ein		FGZ	4	3	1	-	3	-	D
		---	Aus		Front	4	3	2	-	3	-	D
		Vorderachse	Ein	Landstraßen	Front	4	3	2	-	1	-	C
			Ein	(Kreuzungen) (beide 80km/h)	Front(SF)	4	3	3	-	2	-	D
		Hinterachse	Ein		Heck	4	3	2	-	2	-	C
			Ein		FGZ	4	3	2	-	3	-	D
		---	Aus		FGZ	3	3	3	-	3	-	C
		Vorderachse	Ein	Landstraßen (Auffahrten)	Front	3	3	3	-	3	-	C
			Ein	(SF 100km/h, GF 30km/h)	Front(SF)	3	3	3	-	1	-	C
		Hinterachse	Ein		Heck	3	3	3	-	2	-	C
			Ein		FGZ	3	3	3	-	3	-	C

**Tabelle A.8:** Verwendetes Codebook zur Bewertung der S-Parameter (Junge 2014, S-Parameter Codebook 5.0). Moderne Fahrzeuge stehen stellvertretend für Baujahr 2010 oder neuer, beispielsweise Polo 9N, Polo 6R, Golf V, Golf VI, Golf VII. Sonstige Fahrzeuge sind beispielsweise Polo 6N, Golf III, Golf IV. Deutlich wird der Nutzen der passiven Sicherheit durch Gurtnutzung, Strukturverbesserungen und Curtain Airbags.

Kollisionsrichtung (Hauptprüfung)	Stradenart: - Gefahrene Geschwindigkeit [km/h]:	Spielstraße					Stadt			Landstraße		Autobahn (unbegrenzt) $v_{max}$
		0-15	15-30	30-50	50-64	64-80	80-100	100-130	130+			
Front	unter Lkw	Pkw moderne	S0	S0	S1	S1	S2					
		gegurtet	Pkw moderne	S0	S1	S3						
		gegurtet	Pkw sonstige	S0	S0	S1	S2	S2	S3			
	unter Lkw near side	gegurtet	Pkw moderne	S0	S0	S1	S2	S2	S3			
		gegurtet	Pkw moderne	S0	S1	S3						
		gegurtet	Pkw sonstige	S0	S0	S1	S2	S3				
	unter Lkw small-offset	gegurtet	Pkw moderne	S0	S0	S1	S1	S1	S2	S3		
		gegurtet	Pkw moderne	S0	S0	S1	S1	S1	S2	S3		
		gegurtet	Pkw sonstige	S0	S0	S1	S2	S2	S3			
	Motor- raum	ungegurtet	Pkw moderne	S1	S1	S2	S3					
		ungegurtet	Pkw sonstige	S1	S1	S2	S3					
Seite	Flächig	Pkw moderne	S0	S0	S1	S1	S2	S3				
		Pkw sonstige	S0	S0	S1	S2	S3					
	Pfehl	Curtain	Pkw moderne	S0	S1	S1	S2	S3				
		Curtain	Pkw sonstige	S0	S1	S2	S3					
	Flächig	Pkw moderne	S0	S1	S1	S3						
		Kein Curtain	Pkw moderne	S1	S1	S2	S3					
	Pfehl	Kein Curtain	Pkw sonstige	S1	S1	S2	S3					
		Kein Curtain	Pkw sonstige	S1	S2	S3						
	Heck	gegurtet	Pkw	S0	S0	S1	S1	S2	S2	S3		
		Pkw	Pkw	S0	S1	S1	S1	S1	S2	S3		

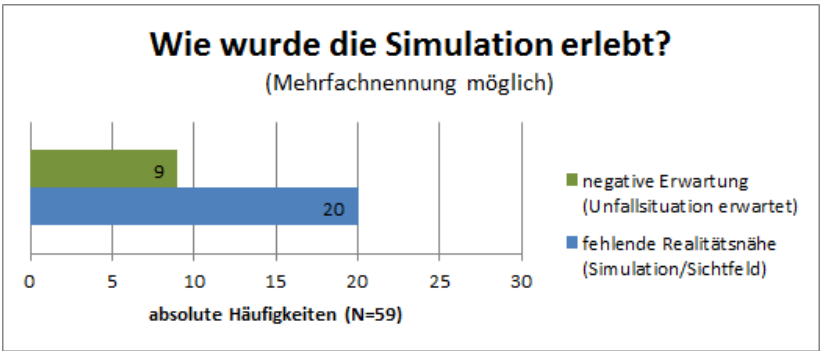
# A.7 Versuche zur Längsverzögerung



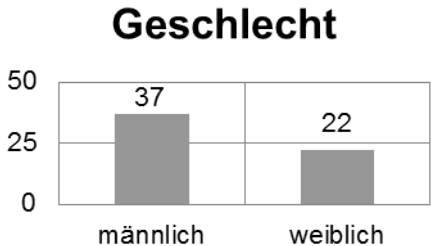
**Abbildung A.5:** Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfehler für drei konsekutive Bremsversuche bei ca. 46 km/h. Bremsanforderung  $-9,5 \text{ m/s}^2$

## A.8 Auswertung der Probandenbefragung

Im Folgenden sind die Ergebnisse des abschließenden Interviews mit den Teilnehmern der Vehicle in the Loop Studie aufgeführt. Wo vorhanden, sind zusätzlich die Anmerkungen der Probanden mit angegeben. Zusätzlich zum Fragebogen wurden die Probanden zum Erleben der Simulation persönlich befragt (Abbildung A.6).



**Abbildung A.6:** Bewertung der Frage zur Simulation: Wie haben Sie die Simulation erlebt?



**Abbildung A.7:** Personenbezogene Daten: Geschlecht

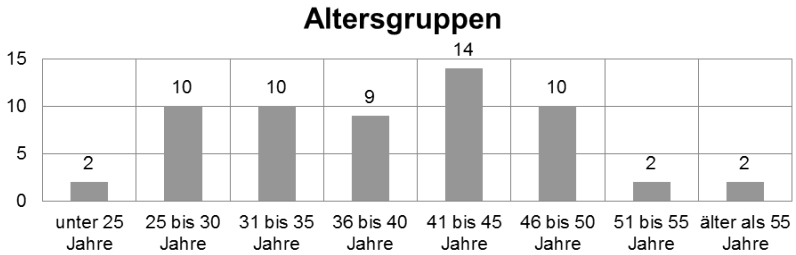


Abbildung A.8: Personenbezogene Daten: Alter

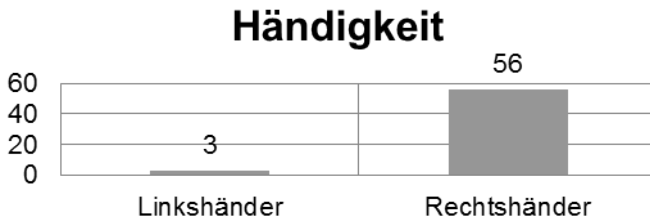


Abbildung A.9: Personenbezogene Daten: Händigkeit

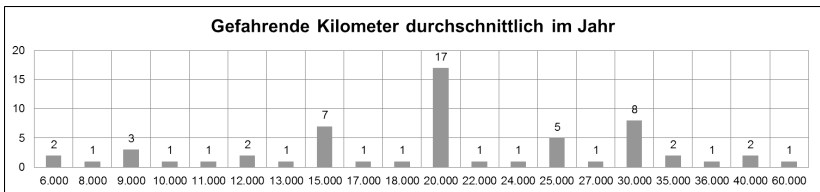
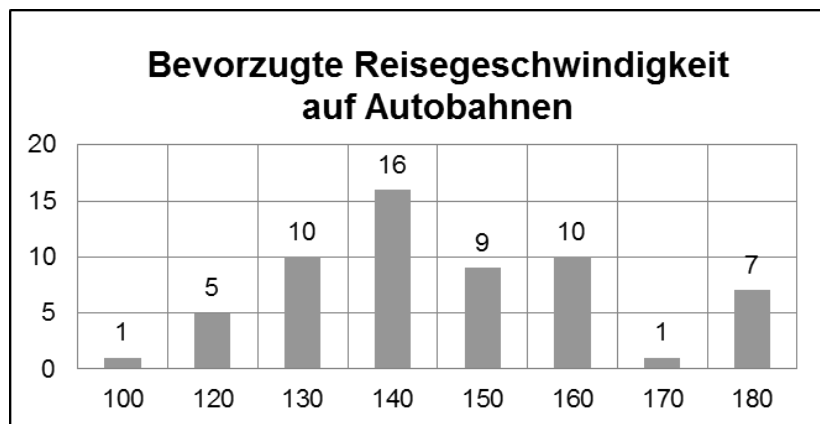
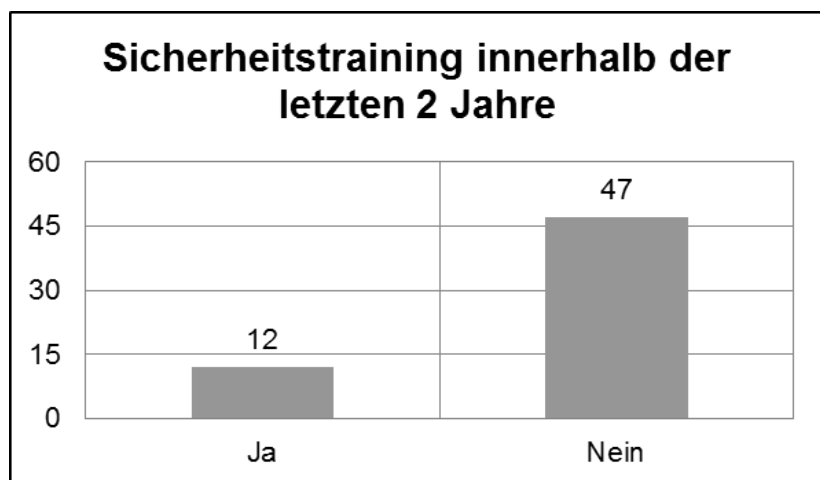


Abbildung A.10: Personenbezogene Daten: Fahrpraxis



**Abbildung A.11:** Personenbezogene Daten: Bevorzugte Reisegeschwindigkeit



**Abbildung A.12:** Personenbezogene Daten: Letztes Sicherheitstraining



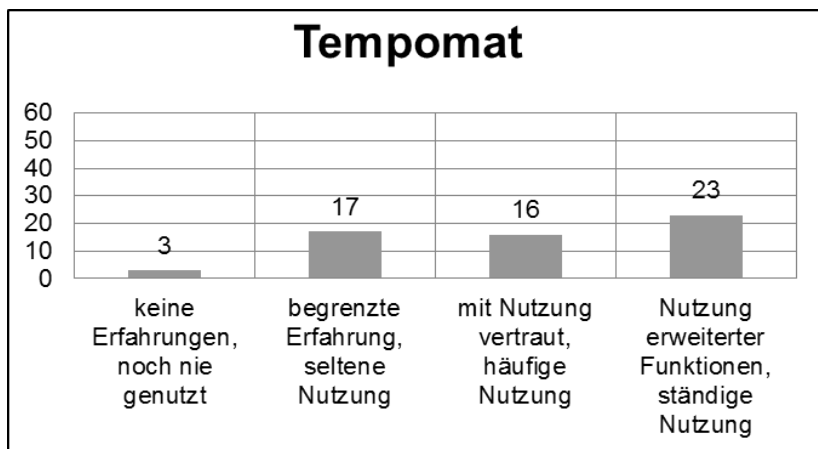


Abbildung A.13: Vorerfahrung mit Technologien: Tempomat

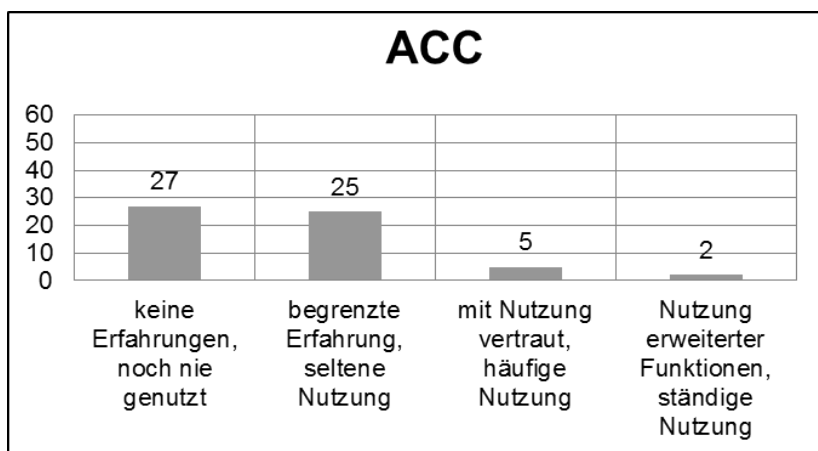


Abbildung A.14: Vorerfahrung mit Technologien: ACC

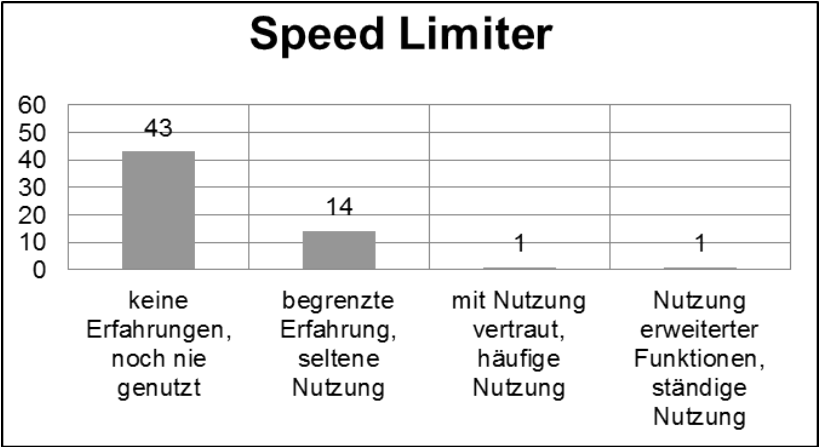


Abbildung A.15: Vorerfahrung mit Technologien: Speed Limiter

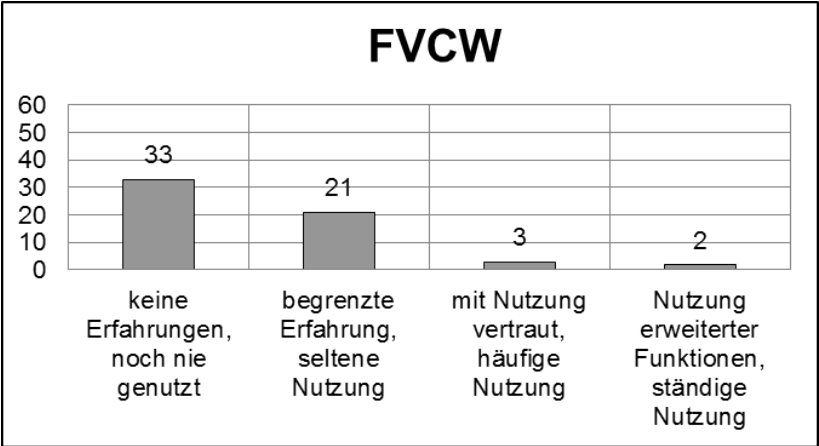
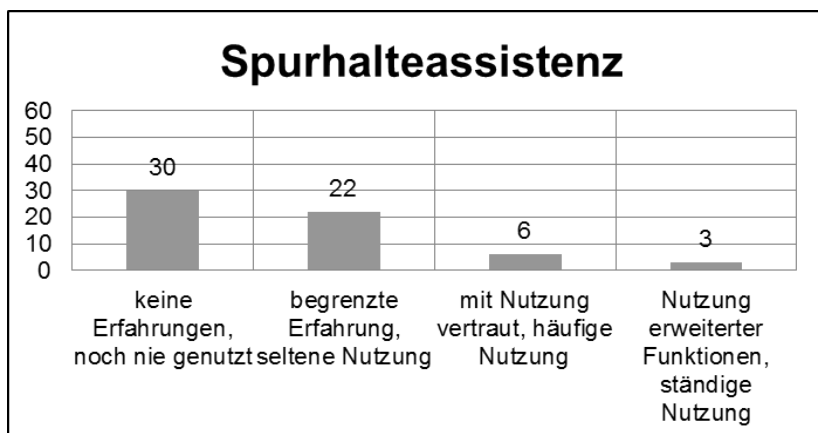
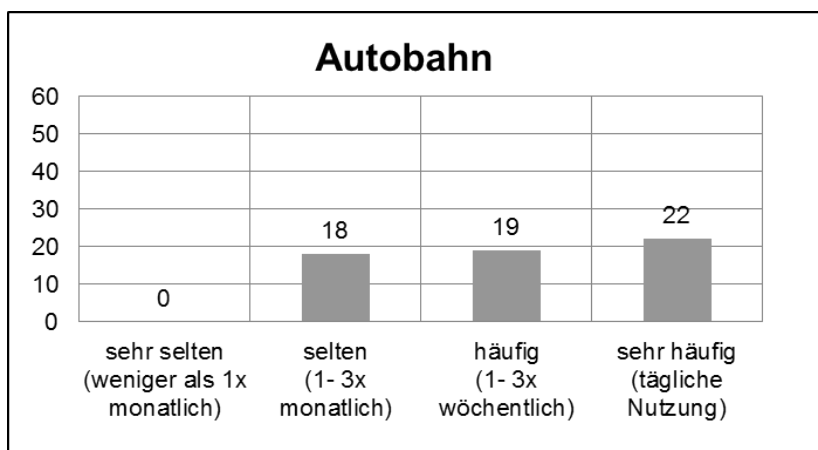


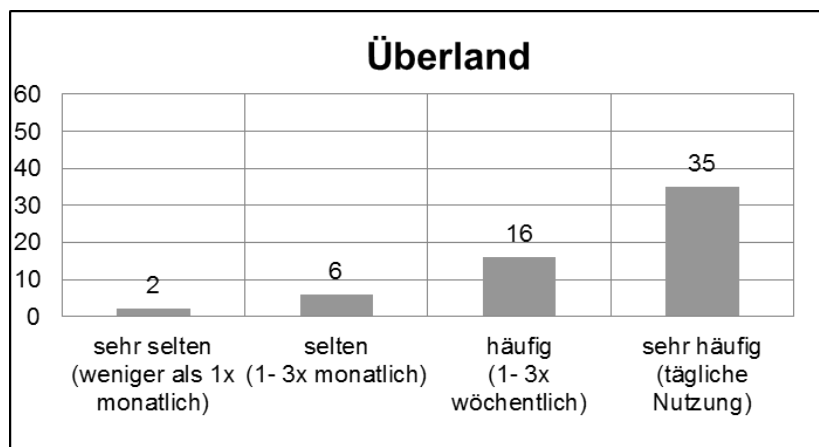
Abbildung A.16: Vorerfahrung mit Technologien: FVCW



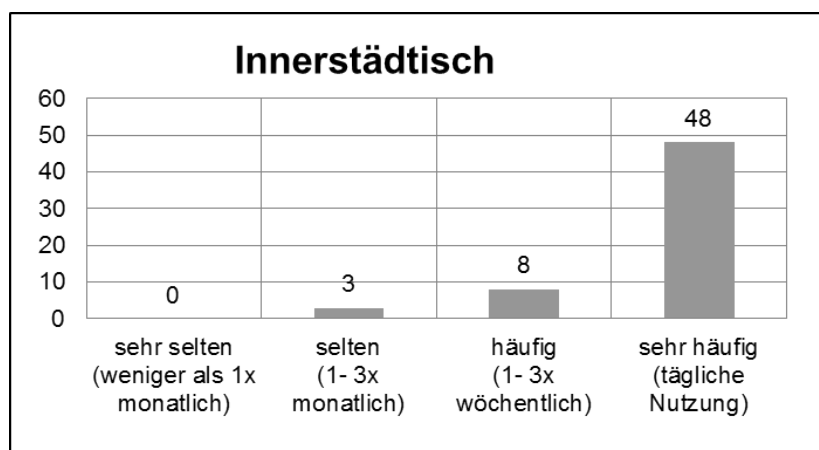
**Abbildung A.17:** Vorerfahrung mit Technologien: Spurhalteassistentz



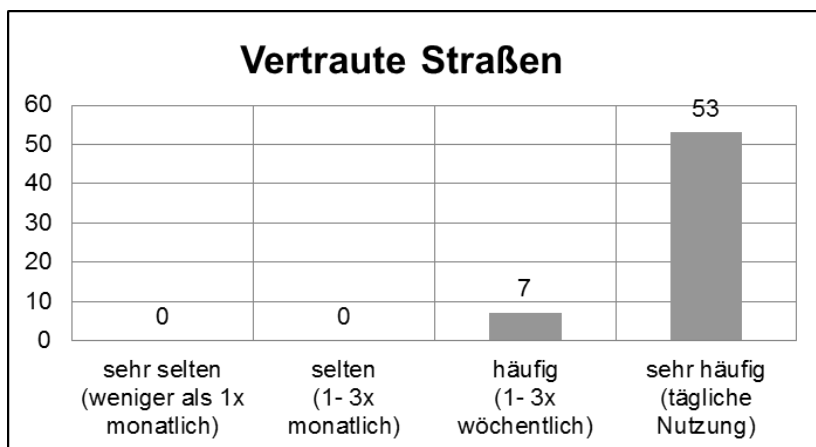
**Abbildung A.18:** Mobilitätsverhalten: Nutzungshäufigkeit Autobahn



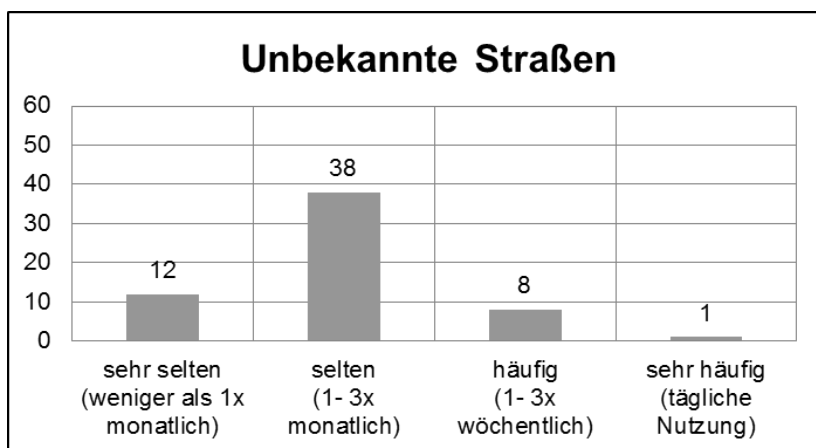
**Abbildung A.19:** Mobilitätsverhalten: Nutzungshäufigkeit Landstraßen



**Abbildung A.20:** Mobilitätsverhalten: Nutzungshäufigkeit urbaner Straßen



**Abbildung A.21:** Mobilitätsverhalten: Nutzungshäufigkeit vertrauter Straßen



**Abbildung A.22:** Mobilitätsverhalten: Nutzungshäufigkeit unbekannter Straßen

### Interview Trefferlagenänderung

#### A. Subjektives Erleben der Situation

1	<b>Wie haben Sie die Situation erlebt?</b>	
	Anmerkungen:	
2	<b>Haben Sie gemerkt, dass das Assistenzsystem eingegriffen hat?</b>	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

#### B. Fragen zum Systemverhalten

1	<b>Falls „ja“, wie haben Sie wahrgenommen, dass das Assistenzsystem eingegriffen hat?</b>	<input type="checkbox"/> Lenkeingriff <input type="checkbox"/> Bremsruck/ Bremsengriff <input type="checkbox"/> sonstiges (Bitte eintragen!)
	Anmerkungen:	
2	<b>In welche Richtung hat das System eingegriffen?</b>	<input type="checkbox"/> Fahrzeug wurde nach links gelenkt <input type="checkbox"/> Fahrzeug wurde nach rechts gelenkt <input type="checkbox"/> sonstiges (Bitte eintragen!)
	Anmerkungen:	
3	<b>Wann glauben Sie hat das System eingegriffen?</b>	<input type="checkbox"/> unmittelbar vor der Kollision <input type="checkbox"/> beim Einfahren in die Kreuzung <input type="checkbox"/> weiß nicht <input type="checkbox"/> sonstiges (Bitte eintragen!)
	Anmerkungen:	
4	<b>Wann glauben Sie hat das System aufgehört einzugreifen?</b>	<input type="checkbox"/> unmittelbar vor der Kollision <input type="checkbox"/> hat gar nicht aufgehört <input type="checkbox"/> weiß nicht <input type="checkbox"/> sonstiges (Bitte eintragen!)
	Anmerkungen:	

Abbildung A.23: Fragebogen Probandeninterview Seite 1

**C. Akzeptanz Systemverhalten**

1	Hatten Sie das Bedürfnis einzuschreiten, um das Verhalten des Assistenzsystems zu verändern?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Anmerkungen:	
2	Falls „ja“, was genau wollten Sie durch Ihr Einschreiten bewirken?	
	Anmerkungen:	
3	Sind Sie eingeschritten, um das Verhalten des Systems zu verändern?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Anmerkungen:	
4	Hätten Sie Bedenken einzuschreiten?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Anmerkungen:	

**D. Wahrgenommene Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs**

1	Hatten Sie in der erlebten Unfallsituation das Gefühl, zu jeder Zeit das Lenkverhalten des Fahrzeugs unter Kontrolle zu haben?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Anmerkungen:	
2	Falls „nein“, warum nicht?	<input type="checkbox"/> Situation unkontrollierbar, Unfall unvermeidbar (Situation unkontrollierbar) <input type="checkbox"/> Fahrzeug war unkontrollierbar und ließ sich nicht lenken, wie ich wollte (Fahrzeug unkontrollierbar) <input type="checkbox"/> ich konnte nicht so schnell reagieren, wie ich wollte (fehlende Handlungskompetenz)
	Anmerkungen:	
3	Falls „ja“, was haben Sie konkret gemacht?	<input type="checkbox"/> gebremst <input type="checkbox"/> nach rechts gelenkt <input type="checkbox"/> nach links gelenkt <input type="checkbox"/> sonstiges (Bitte eintragen!)
	Anmerkungen:	

**Abbildung A.24:** Fragebogen Probandeninterview Seite 2

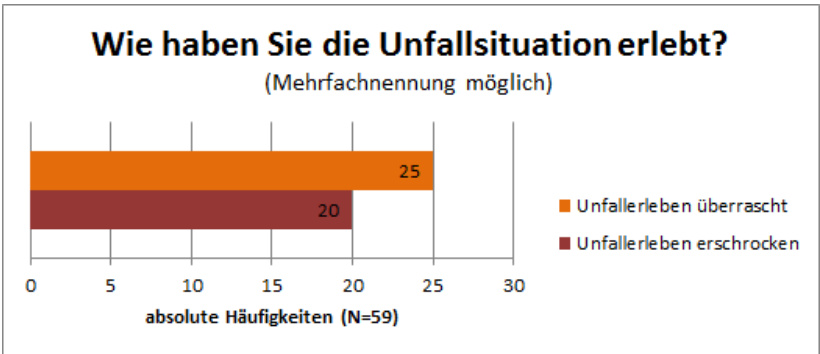


Abbildung A.25: Auswertung Frage A1: Wie haben Sie die Situation erlebt?

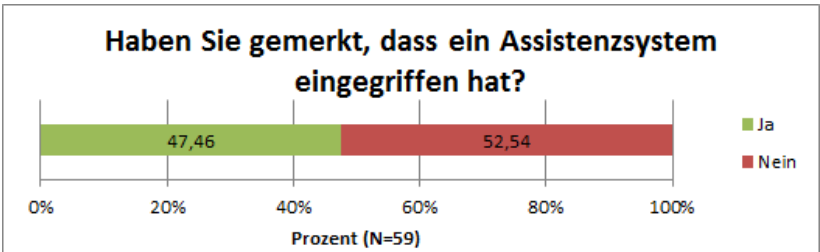
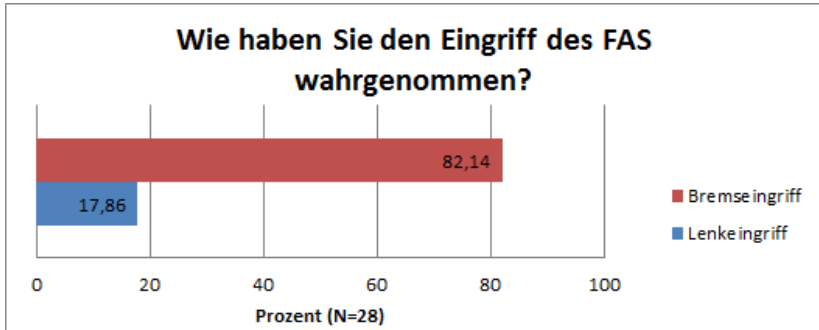
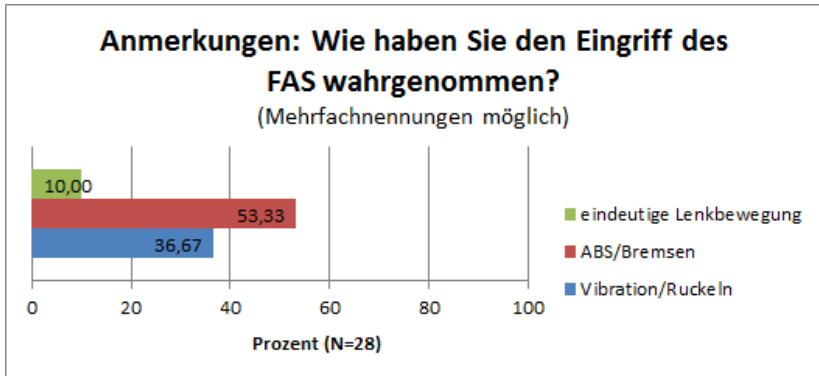


Abbildung A.26: Auswertung Frage A2: Haben Sie gemerkt, dass das Assistenzsystem eingegriffen hat?

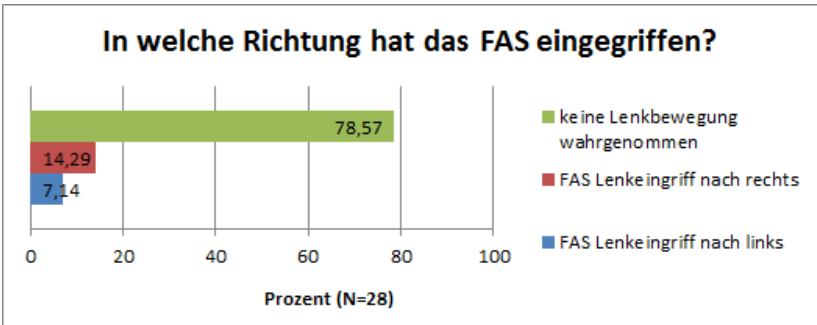




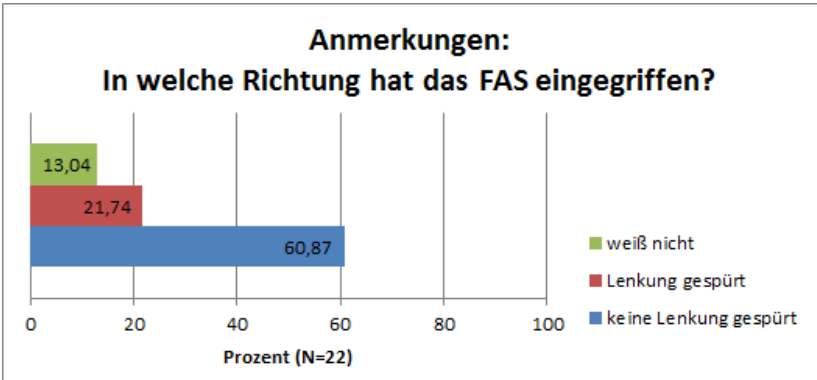
**Abbildung A.27:** Auswertung Frage B1: Falls „ja“, wie haben Sie wahrgenommen, dass das Assistenzsystem eingegriffen hat?



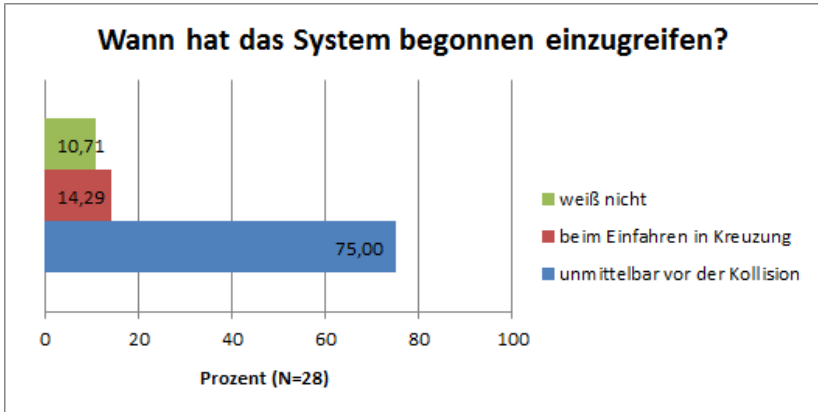
**Abbildung A.28:** Anmerkungen zu Frage B1: Falls „ja“, wie haben Sie wahrgenommen, dass das Assistenzsystem eingegriffen hat?



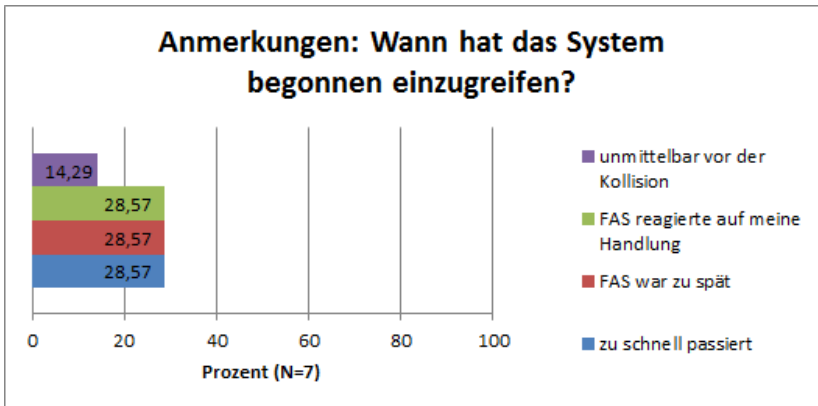
**Abbildung A.29:** Auswertung Frage B2: In welche Richtung hat das System eingegriffen?



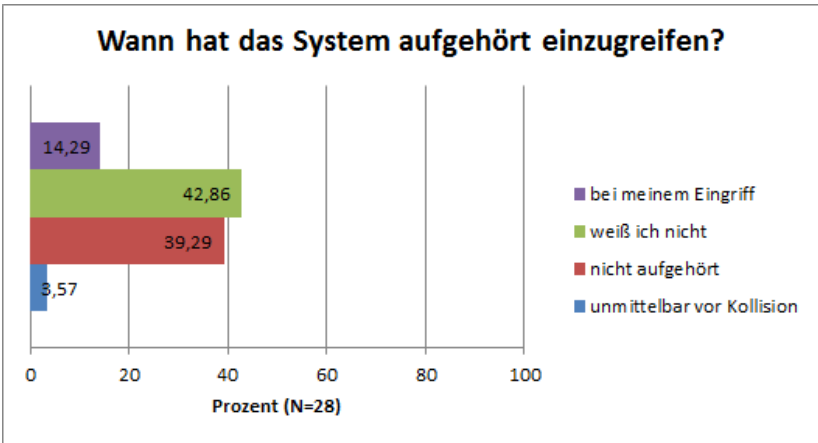
**Abbildung A.30:** Anmerkungen zu Frage B2: In welche Richtung hat das System eingegriffen?



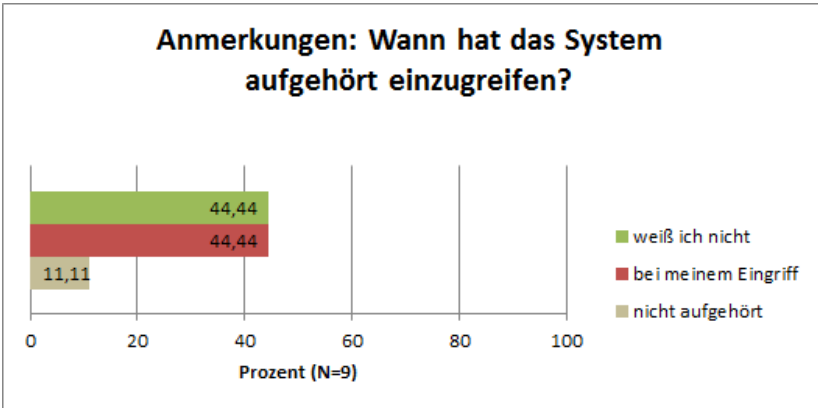
**Abbildung A.31:** Auswertung Frage B3: Wann glauben Sie hat das System eingegriffen?



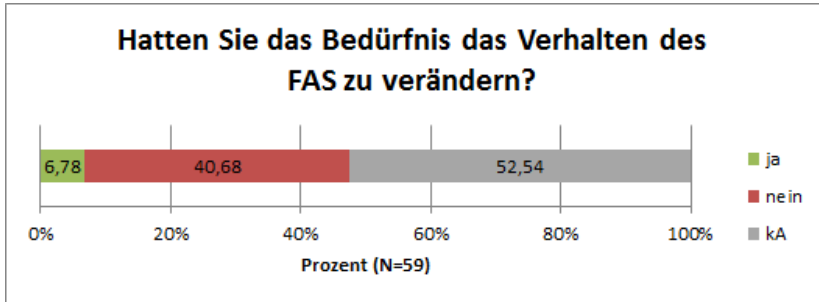
**Abbildung A.32:** Anmerkungen zu Frage B3: Wann glauben Sie hat das System eingegriffen?



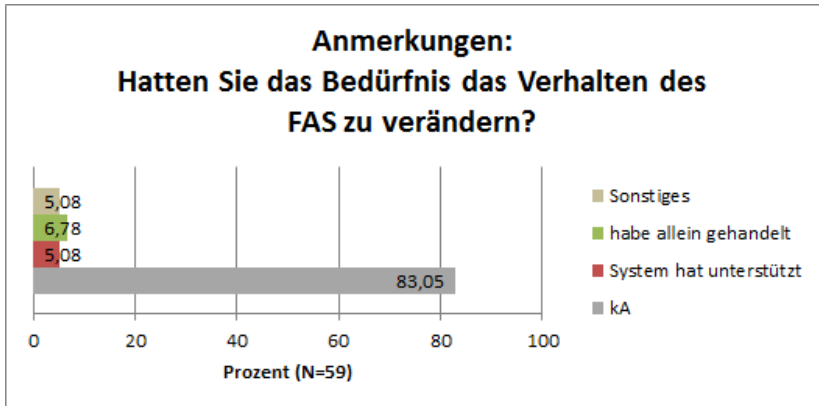
**Abbildung A.33:** Auswertung Frage B4: Wann glauben Sie hat das System aufgehört einzugreifen?



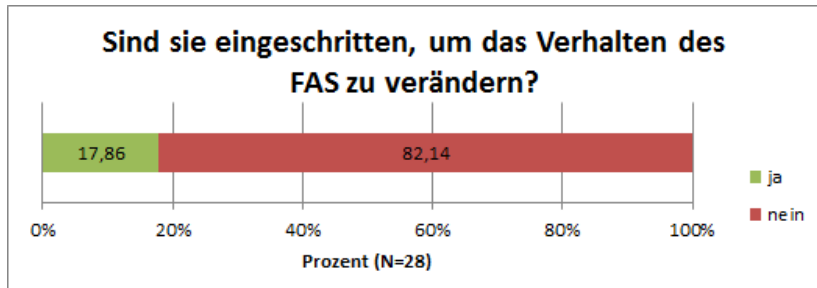
**Abbildung A.34:** Anmerkungen zu Frage B4: Wann glauben Sie hat das System aufgehört einzugreifen?



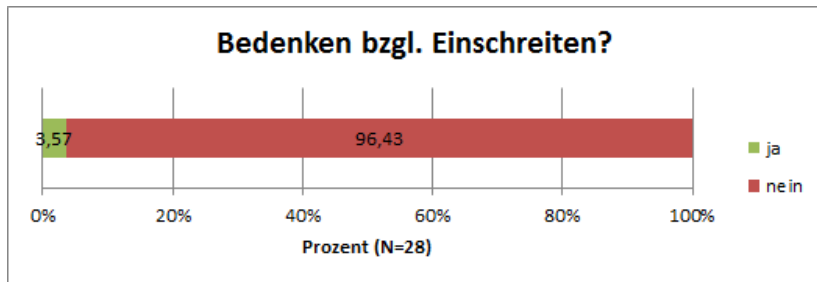
**Abbildung A.35:** Auswertung Frage C1: Hatten Sie das Bedürfnis einzuschreiten, um das Verhalten des Assistenzsystems zu verändern?



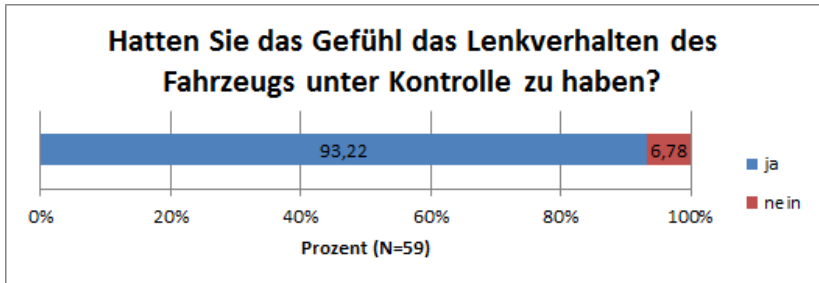
**Abbildung A.36:** Anmerkungen zu Frage C1: Hatten Sie das Bedürfnis einzuschreiten, um das Verhalten des Assistenzsystems zu verändern?



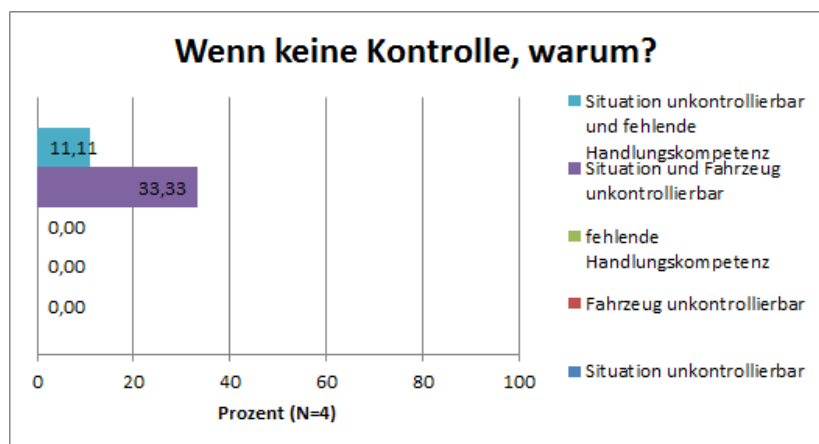
**Abbildung A.37:** Auswertung Frage C3: Sind Sie eingeschritten, um das Verhalten des Systems zu verändern?



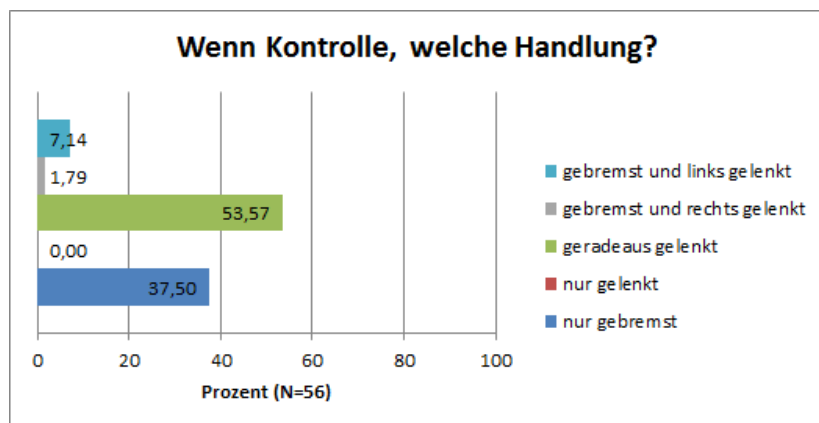
**Abbildung A.38:** Auswertung Frage C4: Hätten Sie Bedenken einzuschreiten?



**Abbildung A.39:** Auswertung Frage D1: Hatten Sie in der erlebten Unfallsituation das Gefühl, zu jeder Zeit das Lenkverhalten des Fahrzeugs unter Kontrolle zu haben?

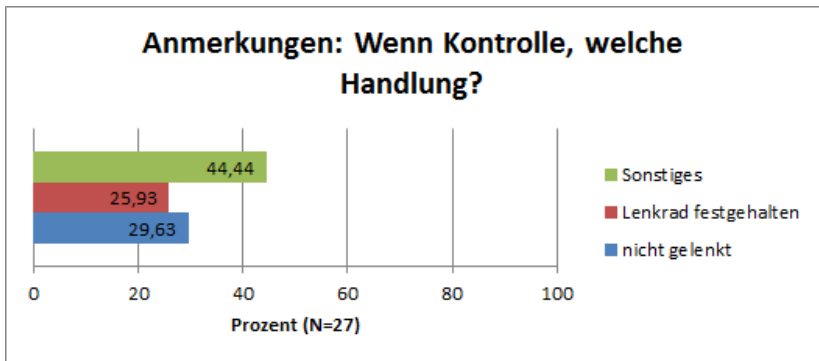


**Abbildung A.40:** Auswertung Frage D2: Falls „nein“, warum nicht?



**Abbildung A.41:** Auswertung Frage D3: Falls „ja“, was haben Sie konkret gemacht?





**Abbildung A.42:** Anmerkungen zu Frage D3: Falls „ja“, was haben Sie konkret gemacht?